
BACHELORARBEIT

Herr
Sebastian Büttner

**Vergleich zweier Verfahren
zur CO₂-Laserglättung von
Mikrostrukturen in Quarzglas**

2013

BACHELORARBEIT

Vergleich zweier Verfahren zur CO₂-Laserglättung von Mikrostrukturen in Quarzglas

Autor:

Herr Sebastian Büttner

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT10wL-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. Nat. Steffen Weißmantel

Zweitprüfer:

Michael Pfeifer M. Sc.

Einreichung:

Mittweida, 13.11.2013

BACHELOR THESIS

Comparison of two CO₂-Laser procedures for smoothing microstructures in fused silica

author:

Mr. Sebastian Büttner

course of studies:

Physical Engineering

seminar group:

PT10wL-B

first examiner:

Prof. Dr. rer. Nat. Steffen Weißmantel

second examiner:

Michael Pfeifer M.Sc.

submission:

Mittweida, 13.11.2013

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname:

Büttner, Sebastian

Thema der Bachelorarbeit:

Vergleich zweier Verfahren zum Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas

Topic of thesis:

Comparison of two CO₂-laser procedures for smoothing microstructures in fused silica

55 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,

Fakultät Mathematik Naturwissenschaften Informatik, Bachelorarbeit, 2013

Kurzreferat

Die derzeit konventionellen Verfahren können für die Glättung von mikrooptischen Elementen nicht eingesetzt werden. Für das Material Quarzglas kann dies durch den Einsatz von CO₂-Laserstrahlung realisiert werden. Durch das Erwärmen des Materials über die Erweichungstemperatur hinaus, wird an der Oberfläche eine dünne Schicht aufgeschmolzen und die Oberfläche zieht sich aufgrund der Oberflächenspannung glatt. Zum Glätten von Mikrostrukturen ist die Erwärmung einer größeren Fläche nötig, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu realisieren und damit auch eine homogene Glättung. Die Glättung kann mit zwei Verfahren realisiert werden, einerseits durch den Einsatz einer Zylinderlinse und andererseits durch einen Scanner. Beide Verfahren liefern Ergebnisse die nur in sehr geringem Maße voneinander abweichen. Bezogen auf Prozesszuverlässigkeit ist das Scanner-Verfahren besser steuerbar, aber weitaus nicht so schnell wie das Zylinderlinsen-Verfahren.

Danksagung

Ich möchte mich bei all denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt Prof. Weißmantel und meinem Betreuer Herrn Pfeifer, die mir die Mittel für die Anfertigung dieser Arbeit bereitstellten und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Des Weiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Laserinstituts der Hochschule Mittweida für ihre Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | V |
| Formelverzeichnis | V |
| Abkürzungsverzeichnis | VIII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Stand der Technik | 2 |
| 1.2 Aufgabenstellung..... | 6 |
| 2 Grundlagen | 7 |
| 2.1 Viskosität von Glas..... | 7 |
| 2.2 Oberflächenspannung | 8 |
| 2.3 Absorption von CO ₂ -Laserstrahlung im Quarzglas..... | 9 |
| 2.4 Thermisches Glätten mit CO ₂ -Laserstrahlung..... | 10 |
| 2.5 Charakterisierung von Oberflächen | 11 |
| 3 Material und Methoden | 13 |
| 3.1 Corning 7980..... | 13 |
| 3.2 CO ₂ -Laser und Anlagenkomponenten | 14 |
| 3.3 Glätten mittels Zylinderlinse | 16 |
| 3.4 Glätten mittels Scanner | 19 |
| 3.5 Teststrukturen | 21 |
| 4 Ergebnisse und Diskussion..... | 25 |
| 4.1 Charakterisierung der Verfahren | 25 |
| 4.1.1 Eigenschaften des Zylinderlinsen-Verfahren | 25 |
| 4.1.2 Abschätzen der optimalen Glättungsparameter für das Zylinderlinsen-Verfahren | 28 |
| 4.1.3 Eigenschaften des Scanner-Verfahren | 32 |
| 4.1.4 Abschätzen der optimalen Glättungsparameter für das Scanner-Verfahren | 35 |
| 4.2 Glätten der Teststrukturen | 36 |
| 4.2.1 mit dem Zylinderlinsen-Verfahren..... | 36 |
| 4.2.2 mit dem Scanner-Verfahren | 44 |
| 4.3 Gegenüberstellung der Verfahren | 51 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick..... | 55 |
| Literaturverzeichnis | i |
| Anhang..... | iv |

| | |
|---|-------------|
| Eigenständigkeitserklärung | xiii |
|---|-------------|

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Chemisch-mechanisches Polieren einer sphärischen Linse mit Synchronspeed-Kinematik..... | 2 |
| Abbildung 2: Werkzeug- und Werkstückbewegung beim Polieren..... | 3 |
| Abbildung 3: Prinzip magnetorheologisches Polieren..... | 3 |
| Abbildung 4: Prinzipskizze Micro- Jet-Polieren..... | 4 |
| Abbildung 5: Prinzipskizze Ionenstrahlkorrektur..... | 5 |
| Abbildung 6: Viskositäts-Temperatur-Diagramm von Glas..... | 7 |
| Abbildung 7: Kraftwirkung auf die Moleküle einer Flüssigkeit..... | 8 |
| Abbildung 8: Transmissionskurve Corning 7980..... | 13 |
| Abbildung 9: CO ₂ -Laser SM 600P der Firma FEHA..... | 14 |
| Abbildung 10: schematische Darstellung der Laseranlage mit Scanner..... | 15 |
| Abbildung 11: schematische Darstellung der Laseranlage mit Zylinderoptik und Linearachse..... | 16 |
| Abbildung 12: Schema Glätten mit Zylinderlinse..... | 17 |
| Abbildung 13: qualitative Darstellung der Intensitätsverteilung im Fokus einer Zylinderlinse..... | 18 |
| Abbildung 14: Glättungsbereich auf einer aufgerauten Corningscheibe..... | 19 |
| Abbildung 15: Glättungsbereich auf einer aufgerauten Corningscheibe..... | 19 |
| Abbildung 16: Mäanderbahn des Laserstrahls beim Abrastern des zu glättenden Bereichs..... | 20 |
| Abbildung 17: entstehendes Temperaturfeld bei Abrasterung mit einem Scanner..... | 20 |
| Abbildung 18: Temperatur-Zeit-Verläufe Scanner-Verfahren..... | 21 |
| Abbildung 19: Corningscheibe aufgeraut..... | 21 |
| Abbildung 20: Mikroskopaufnahme der mittels Fluorlaser hergestellten Teststruktur..... | 22 |
| Abbildung 21: Konfokalmikroskopaufnahme Strukturausschnitt..... | 22 |
| Abbildung 22: 3D-Darstellung eines Bohrlochrasters..... | 23 |
| Abbildung 23: optimaler Temperaturverlauf beim überfahren des Glättungsbereichs..... | 25 |
| Abbildung 24: Temperaturverläufe die zu einer inhomogenen Glättung führen..... | 26 |
| Abbildung 25: Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren erzeugte Glättungsfelder..... | 27 |
| Abbildung 26: Substratverformung bei einer Maximaltemperatur von..... | 27 |
| Abbildung 27: Normierte Rauheit für verschiedene Temperaturen und Vorschubgeschwindigkeiten..... | 28 |
| Abbildung 28: Ausgangsrauheit der aufgerauten Corningscheiben bei verschiedenen Grenzwellenlängen..... | 29 |
| Abbildung 29: Normierte Rauheit erzeugter Testfelder unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c=25\text{ }\mu\text{m}$ | 30 |
| Abbildung 30: Normierte Rauheit erzeugter Testfelder unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c=0,8\text{ }\mu\text{m}$ | 30 |
| Abbildung 31: Dämpfung der Rauheit bei $T=1600\text{ }^\circ\text{C}$ und verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten..... | 31 |
| Abbildung 32: Mit dem Scanner-Verfahren erzeugte Testfelder..... | 32 |
| Abbildung 33: Temperaturkurven der mit dem Scanner-Verfahren geglätteten Felder..... | 33 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 34: Einwirkzeit für $T = 1600 - 2100\text{ °C}$. | 33 |
| Abbildung 35: Substratverformung bei einer Maximaltemperatur von $T = 2100\text{ °C}$. | 34 |
| Abbildung 36: Dämpfung der Rauheit mit dem Scanner-Verfahren. | 35 |
| Abbildung 37: Normierte Rauheit der Testfelder bei Verwendung verschiedene Grenzwellenlängen λ_c . | 35 |
| Abbildung 38: Kofokalmikroskopaufnahme der Struktur 1a vor dem Glätten. | 36 |
| Abbildung 39: Kofokalmikroskopaufnahme der Struktur 1a nach dem Glätten. | 36 |
| Abbildung 40: Struktur Typ 1c vor dem Glätten. | 37 |
| Abbildung 41: Struktur 1c nach dem Glätten. | 37 |
| Abbildung 42: Auf der Struktur 1c aufgeschmolzenes Debris. | 37 |
| Abbildung 43: Profilschnitt der Struktur 1a vor dem Glätten. | 38 |
| Abbildung 44: Profilschnitt der Struktur nach dem Glätten. | 39 |
| Abbildung 45: Profilschnitt quer zur Vorschubrichtung der Struktur 1b nach dem Glätten. | 39 |
| Abbildung 46: Struktur 1c in der Draufsicht vor und nach dem Glätten. | 40 |
| Abbildung 47: Profilschnitt in Vorschubrichtung der Struktur 1c nach dem Glätten. | 41 |
| Abbildung 48: Strukturturen vor und nach dem Glätten. | 42 |
| Abbildung 49: Profilschnitt des Bohrlochrasters vor dem Glätten. | 42 |
| Abbildung 50: Profilschnitt des Bohrlochrasters nach dem Glätten. | 43 |
| Abbildung 51: Flächenrauheit der Bohrungsböden vor und nach dem Glätten. | 43 |
| Abbildung 52: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a vor dem Glätten. | 44 |
| Abbildung 53: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a nach dem Glätten. | 44 |
| Abbildung 54: Profilschnitt der Struktur 3b nach dem Glätten. | 45 |
| Abbildung 55: Temperaturkurven beim Glätten von Struktur 3a und 3b. | 45 |
| Abbildung 56: Temperaturkurven für verschiedene Regelungsparameter. | 46 |
| Abbildung 57: Temperaturkurven mit angepassten Parametern. | 46 |
| Abbildung 58: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a nach dem Glätten. | 47 |
| Abbildung 59: Profilschnitt der Struktur vom Typ 3b nach dem Glätten. | 47 |
| Abbildung 60: Höhenstufen der Strukturen Typ 4 vor und nach dem Glätten. | 48 |
| Abbildung 61: Profilschnitt der Struktur 4c vor dem Glätten. | 49 |
| Abbildung 62: Profilschnitt der Struktur 4c nach dem Glätten. | 49 |
| Abbildung 63: Ermittelte Flächenrauheit der Strukturen vom Typ 4 vor und nach dem Glätten. | 50 |
| Abbildung 64: Abhängigkeit der Breite sowie des Durchmessers des Glättungsbereichs von der Temperatur. | 51 |
| Abbildung 65: Ermittelte Flächenrate für die Verfahren in Abhängigkeit von der Temperatur. | 52 |
| Abbildung 66: Substratverformung im Bereich der Teststruktur 1c nach der Glättung mit dem Zylinderlinsen-Verfahren unter Einsatz ein Heizplatte. | 53 |
| Abbildung 67: Substratverformung im Bereich der Teststruktur 3b nach der Glättung mit dem Scanner-Verfahren unter Einsatz ein Heizplatte. | 53 |
| Abbildung 68: Konfokalmikroskopaufnahme Test-DOE | 54 |
| Abbildung 69: Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren geglättetes Test-DOE. | 54 |
| Abbildung 70: Test-DOE mit Zylinderlinsen-Verfahren geglättet, $T = 1650\text{ °C}$, $v_f = 5\text{ mm/s}$. | 54 |
| Abbildung 71: Test-DOE mit Scanner-Verfahren geglättet, $T = 1650\text{ °C}$. | 54 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Auszug aus Datenblatt Corning 7980 [Cor13]. | 13 |
| Tabelle 2: | Herstellungsparameter der Gitterstruktur Probe 1. | 23 |
| Tabelle 3: | Herstellungsparameter der Bohrlochraster Probe 1. | 24 |
| Tabelle 4: | Herstellungsparameter Gitterstruktur Probe 2. | 24 |
| Tabelle 5: | Herstellungsparameter der Bohrlochraster Probe 2. | 24 |
| Tabelle 6: | Temperaturen und Spurbreiten der mit $v_f=5$ mm/s hergestellten Testfelder. | 27 |
| Tabelle 7: | Temperaturen und Durchmesser der mit dem Scanner-Verfahren erzeugten Testfelder. | 32 |
| Tabelle 8: | gemessene Höhenstufen an Struktur 1c vor und nach dem Glätten. | 40 |
| Tabelle 9: | gemessene Höhenstufen der Struktur 3b vor und nach dem Glätten. | 48 |

Formelverzeichnis

| | |
|------------|---|
| A | Absorptionsgrad |
| ΔA | Änderung der Fläche |
| b | Breite der Glättungsspur |
| d | Durchmesser Glättungsbereich |
| d_L | Durchmesser Laserstrahl |
| d_{min} | minimaler Messfleckdurchmesser |
| e | Euler'sche Zahl |
| FR | Flächenrate |
| FR_s | Flächenrate Scanner-Verfahren |
| FR_z | Flächenrate Zylinderlinsen-Verfahren |
| f | Brennweite |
| I_0 | Ausgangsintensität |
| $I(z)$ | Intensität in der Materialtiefe z |
| k | Strahlqualitätskennzahl |
| q | Bahnabstand |
| R | Reflexionsgrad |
| R_a | arithmetisch gemittelte Linienrauheit |
| R_{pv} | Abstand zwischen höchstem und niedrigsten Punkt eines Profils innerhalb einer Messstrecke |
| R_q | Quadratisch gemittelte Linienrauheit |
| S_q | quadratisch gemittelte Flächenrauheit |
| T | Transmissionsgrad |
| T_E | Erweichungstemperatur |
| T_g | Transformationstemperatur |
| T_{max} | Maximaltemperatur |
| t_{abs} | absolute Aufwärmzeit |
| t_{ewz} | Einwirkzeit |

| | |
|---------------|--|
| t_{int} | Interaktionszeit |
| Δt | Zeitintervall |
| v_f | Vorschubgeschwindigkeit |
| v_s | Scann-Geschwindigkeit |
| w_0 | Linienbreite im Fokus |
| $w(z_{def})$ | Linienbreite des Laserstrahls bei Defokussierung |
| ΔW | zu leistende Arbeit |
| z | Materialtiefe |
| z_{abs} | Absorptionstiefe |
| z_{def} | Defokussierung |
| | |
| α | Absorptionskoeffizient |
| ε | Emissionsgrad |
| η | Viskosität |
| λ | Wellenlänge |
| λ_c | Grenzwellenlänge (Cut-off) |
| π | Kreiszahl |
| σ | Oberflächenspannung |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| AJP | Active-Jet-Polieren (engl. active-jet-polishing) |
| CMP | chemisch-mechanisches Polieren |
| CO ₂ | chem. Symbol für Kohlenstoffdioxid |
| FJP | Fluid-Jet-Polieren (engl. fluid-jet-polishing) |
| MJP | Micro-Jet-Polieren (engl. micro-jet-polishing) |
| MRP | magnetorheologisches Polieren |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| SPS | speicherprogrammierbare Steuerung |
| SiO ₂ | chem. Symbol für Siliziumdioxid |

1 Einleitung

Der Laser ist eines der vielfältigsten Werkzeuge unserer Zeit, welches in vielen Bereichen der Industrie zum Einsatz kommt, sei es beim Schneiden von Kunststoffen, Schweißen von Metallen oder Beschriftung von elektronischen Bauelementen. Je nach Anwendung, Bearbeitungsregime und Material muss der entsprechende Laser gewählt werden, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Obwohl der Laser eine hervorragende Strahlquelle ist, kann der Laserstrahl in den seltensten Fällen direkt zur Materialbearbeitung eingesetzt werden. Meist muss dieser für die jeweilige Anwendung durch eine Linse oder ganze Linsensysteme aufbereitet werden. Der Laserstrahl kann durch solche Strahlformungselemente beispielsweise direkt fokussiert oder für das Maskenprojektionsverfahren aufgeweitet und homogenisiert werden. Jedes Strahlformungselement muss entsprechend der Wellenlänge des Lasers gewissen Anforderungen genügen. Dabei spielen die Formgenauigkeit und die Rauheit der optischen Oberflächen eine wesentliche Rolle. Die Hersteller geben meist die Formgenauigkeit bezogen auf die Wellenlänge an. Diese beträgt für qualitativ hochwertige Elemente nur einen Bruchteil der verwendeten Wellenlänge, wie z.B. $\lambda/20$. Die Herstellung solcher hochpräzisen optischen Elemente, deren Formgenauigkeit im Bereich von wenigen zehn bis wenige hundert Nanometern liegt, erfordert auch eine dementsprechende Fertigungstechnologie. Doch nicht nur die Form, sondern auch die Rauheit der Oberfläche ist maßgeblich für deren Qualität. Die derzeit eingesetzten konventionellen Polierverfahren können diesem Anspruch für einfache sphärische und asphärisch Geometrien gerecht werden, sind jedoch sehr zeit- und kostenintensiv. Des Weiteren gibt es auch optische Elemente deren Oberfläche nicht mit konventionellen Verfahren bearbeitet werden kann. Auch für dieses Problem bietet der Laser eine Lösung. Durch den Einsatz von CO₂-Laserstrahlung kann die Oberfläche von, in Quarzglas eingebrachte diffraktiven optischen Elementen (DOEs), geglättet werden. In diversen Arbeiten wurden zu diesem Thema bereits viele Untersuchungen gemacht. Der große Vorteil beim Glätten mit CO₂-Laserstrahlung ist, dass dieser Prozess im Vergleich zu den derzeit eingesetzten Verfahren sehr schnell ist und nicht von der Geometrie der optischen Elemente abhängt. Doch meist gibt es bei der Entwicklung von Verfahren mehrere Vorgehensweisen und Verfahrensregime, deren Vor- und Nachteile ermittelt werden müssen, um einen zuverlässigen Einsatz zu garantieren. In dieser Arbeit sollen zwei verschiedene CO₂-Laserglättungsverfahren durch die Anwendung auf Mikrostrukturen verglichen werden, um für eine spätere Anwendung auf DOEs das beste Verfahren zu ermitteln.

1.1 Stand der Technik

Chemisch mechanisches Polieren

Das chemisch-mechanische Polieren (CMP) ist der letzte Bearbeitungsschritt bei der Herstellung vieler optischer Elemente. Bei diesem Verfahren wirken chemische und mechanische Prozesse zusammen. Zum einen kommt es zu einem Auslaugen der Glasoberfläche durch die Poliersuspension und zum anderen wird die Oberfläche durch das Poliermittel und dessen Träger geglättet [Neu05]. Das Verfahren eignet sich besonders zum Polieren von sphärischen Optiken (siehe Abbildung 1), sowohl zur Endbearbeitung als auch zur Formkorrektur.

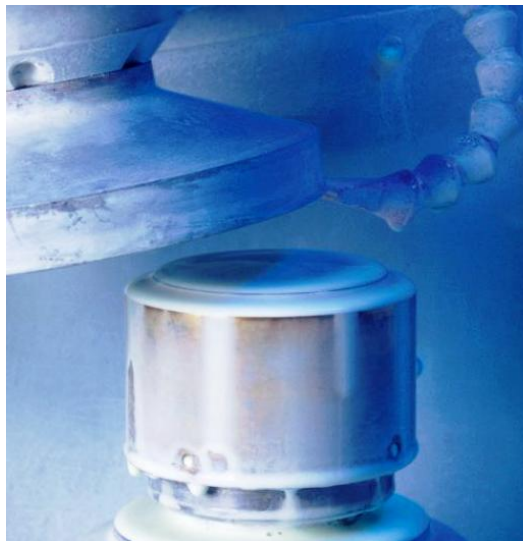


Abbildung 1: Chemisch-mechanisches Polieren einer sphärischen Linse mit Synchrospeed-Kinematik [Gie08].

Durch den Einsatz von computergesteuerten Werkzeugmaschinen ist die Politur von asphärischen Optiken ebenfalls möglich [Gie08]. Für den großflächigen Werkzeugeingriff gibt Bliedtner [Bli10] eine erreichbare Rauheit von $R_q = 5 - 100 \text{ nm}$ an. Die Glättung von Mikrostrukturen ist mit diesem Verfahren nicht sinnvoll, da keine Glättungswirkung in tieferen Bereichen der Strukturen zu erwarten ist.

Mechanisches Polieren mittels Schaftwerkzeug

Ein weiteres abrasives Verfahren zur Endbearbeitung von Linsen ist das Polieren mit-

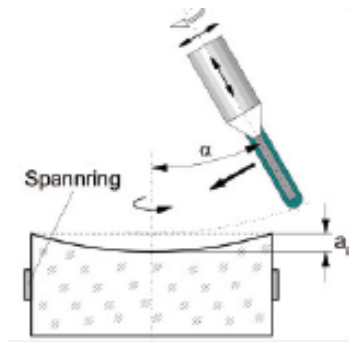


Abbildung 2: Werkzeug- und Werkstückbewegung beim Polieren [Hof11].

tels Schaftwerkzeugen. Dabei kommen formgebundene Mikropolierschleifstifte zum Einsatz. Die Polierstifte bestehen aus einem geschliffenen Hartmetallgrundkörper, Diamantkörnern verschiedener Größe und verschiedenen Kunstharzen. Als Poliermittel dient das mit den Diamantkörnern vermischte Kunstharz. Die Polierwirkung wird durch die Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück realisiert. Mit der Mantelfläche des Polierstiftes können auch ebene Flächen poliert werden. Die erreichte mittlere Rauheit liegt bei $R_a = 8 \text{ nm}$ [Hof11]. Die

Anwendung auf Mikrostrukturen ist für dieses Verfahren nicht sinnvoll, da vergleichbar zum CMP mit keiner Glättungswirkung in der Tiefe der Strukturen zu rechnen ist.

Magnetorheologisches Polieren

Ein oft eingesetztes Verfahren für die Politur von sphärischen und, vor allem, asphärischen Optiken ist das magnetorheologische Polieren (MRP). Es ist ein abrasives Verfahren bei dem eine magnetorheologische Flüssigkeit zum Einsatz kommt, der abrasive Partikel beigemischt werden. Bei magnetorheologischen Flüssigkeiten kommt es zu einer Erhöhung der Viskosität aufgrund einer Kraftwirkung, die durch ein Magnetfeld verursacht wird. Eine solche Flüssigkeit wird auf einen sich drehenden Aluminiumzylinder gegeben, an den ein Magnetfeld angelegt wird. Aufgrund des Magnetfeldes bildet sich auf dem Aluminiumzylinder eine hochviskose Wulst, die sich bei Kontakt mit dem Werkstück an die Oberfläche anlegt. Aufgrund der hohen Viskosität der abrasiven Suspension und deren Relativbewegung zum Werkstück kommt es an der Kontaktfläche zum Materialabtrag [Bli10]. Mit dem MRP können Formgenauigkeiten von $R_{pv} = \lambda/20$ erreicht werden, eine erreichbare Rauigkeit wird in der Literatur nicht angegeben [Bli10, Pol03].

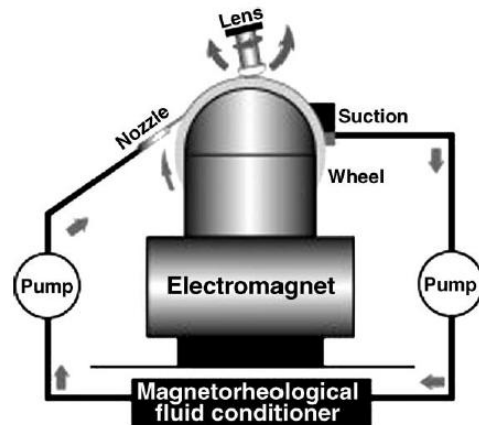


Abbildung 3:Prinzip magnetorheologisches Polieren [Bec02].

Dieses Verfahren ist ungeeignet für das Glätten von Mikrostrukturen, da aufgrund der abrasiven Wirkung mit der Zerstörung der Strukturen zu rechnen ist.

Fluid-Jet-Polieren

Ein weiteres Verfahren, das mit einer Flüssigkeit arbeitet, ist das Fluid-Jet-Polieren (FJP), ein abrasives Verfahren zur Endbearbeitung sphärischer und asphärischer Optiken. Dabei werden einer Flüssigkeit (engl. Fluid) abrasive Partikel beigemischt und diese dann über eine Düse, unter einem Druck von 3-20 bar, in einem Strahl (engl. Jet) auf die zu bearbeitende Oberfläche gesprüht [Wil05]. Der Strahl ist ein verschleißfreies Werkzeug, dessen Wirkung vor allem von der Düsenform, dem Auftreffwinkel sowie der Partikelgröße, -masse und -geschwindigkeit abhängt. Fährle [Fäh98] gibt die Senkung des Rauheitswertes von $R_q = 350 \text{ nm}$ auf $R_q = 25 \text{ nm}$ an und Bliedner [Bli10] den Bereich von $R_q = 2 - 5 \text{ nm}$.

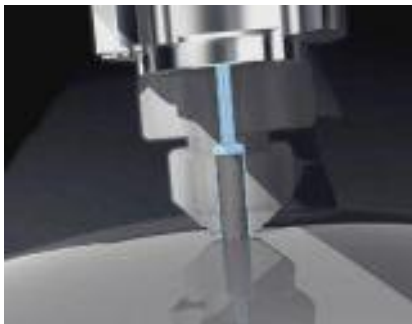


Abbildung 4: Prinzipskizze Micro-Jet-Polieren [Opt13].

Neben dem FJP gibt es ein abgewandeltes Verfahren, das Mikro-Jet-Polieren (MJP) oder auch Aktiv-Jet-Polieren (AJP) genannt. Der Unterschied zum FJP besteht darin, dass beim MJP ein Poliermittelträger durch einen Flüssigkeitsstrahl auf die Oberfläche gepresst wird. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Werkstückoberfläche, dem Poliermittelträger und der Suspension kommt es zu einem Materialabtrag. Vorteile dieses Verfahrens sind die weniger hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Bewegungssystems [Bli10]. Nachteil ist, dass hierbei die Polierwirkung durch den Poliermittelträger erzielt wird und nicht durch den verschleißfreien Flüssigkeitsstrahl. Das MJP-Verfahren ist zum Glätten von Mikrostrukturen nicht geeignet, da dessen Wirkung vergleichbar mit dem CMP-Prozess ist.

Ionenstrahl-Polieren

Eine Alternative zum FJP-Verfahren, bei der die Oberfläche ebenfalls mit einem Strahl bearbeitet wird, bietet das Ionenstrahl-Polieren. Das Ionenstrahl-Polieren ist ein hochpräzises Verfahren zur Endbearbeitung von Oberflächen bzw. für die Korrektur von Formabweichungen. Als Werkzeug dient dabei ein Ionenstrahl, der auf die Werkstückoberfläche fokussiert wird. Der aus dem Beschuss mit energiereichen Ionen resultie-

rende Sputter-Prozess ermöglicht eine Tiefenauflösung im Submikrometerbereich und ist auf fast allen, in der Optikfertigung gebräuchlichen Materialien, anwendbar.

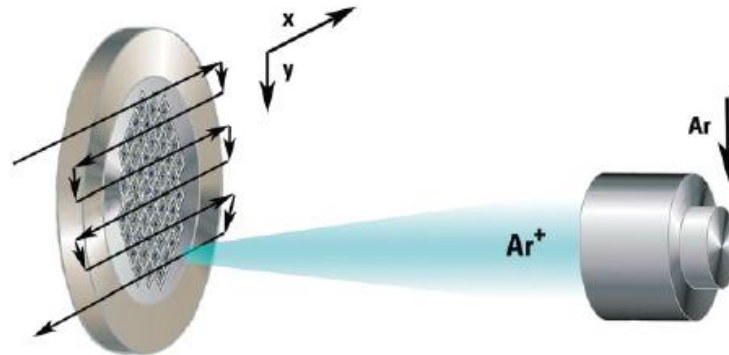


Abbildung 5: Prinzipskizze Ionenstrahlkorrektur [Nes11].

Des Weiteren kann mit dem Ionenstrahl aufgrund seines geringen Durchmessers von bis zu 0,5 mm Halbwertsbreite eine gute räumliche Auflösung erreicht werden. D.h. es können Oberflächenwellenlängen im Submillimeterbereich beseitigt werden [Arn09]. Durch optimierte Ionenquellen ist eine Bearbeitungsgenauigkeit von $R_{pv} = \lambda/50$ [Nes11] und eine Rauheit unter $R_q = 0,2 \text{ nm}$ [Hän07] erreichbar. Die Bearbeitung von 3D-Geometrien kann durch eine Fokuspachführung realisiert werden. Dadurch lassen sich Konturen mit $R_{pv} < 30 \text{ nm}$ herstellen. Bliedner [Bli10] gibt für das Verfahren Rauigkeiten bis in den 0,1 nm- Bereich an.

Cluster-Sputtern

Eine Alternative zum Ionenstrahlpolieren stellt das Cluster-Sputtern dar. Im Vergleich zum Ionenstrahl- bzw. Atom-Sputtern werden bei diesem Verfahren sogenannte Cluster erzeugt. Die Bearbeitung von Festkörperoberflächen mit einem Clusterionenstrahl kann, je nach kinetischer Energie der Clusterionen, verschiedenste Auswirkungen haben. Unter anderem kann die Oberfläche von Festkörpern geglättet werden. Für Silizium und Kalknatronglas wurde eine mittlere Rauheit im Nanometer- bzw. Subnanometerbereich erreicht, allerdings bei sehr geringer Ausgangsrauheit [Oet97]. Die Glättung von Mikrostrukturen durch Cluster-Sputtern ist durchaus vorstellbar, wurde aber bisher noch nicht untersucht. Das Verfahren kommt derzeit industriell nicht zum Einsatz.

Entscheidender Nachteil der Technologien Ionenstrahlpolieren und Cluster-Sputtern ist, dass der Ionen- bzw. Clusterbeschuss unter einem bestimmten Winkel erfolgen muss um einen Sputter-Prozess zu realisieren. Bei der Anwendung auf DOEs ist durch die diskreten Höhenstufen mit Abschattungseffekten an den Kanten der einzelnen Höhenstufen zu rechnen. Demnach ist mit diesem Verfahren keine gleichmäßige Glättung der DOEs zu erwarten.

1.2 Aufgabenstellung

Diese Arbeit stellt zwei Laserverfahren zum glätten von Mikrostrukturen gegenüber. Im Zuge dessen wurden bereits konventionelle Verfahren der Optikfertigung vorgestellt und ihre Anwendbarkeit auf Mikrostrukturen diskutiert.

Um einen sinnvollen Vergleich beider Verfahren zu realisieren, wird im Vorfeld für jedes Verfahren eine Parameterstudie durchgeführt. Diese sollen eine Aussage darüber liefern, welche Parameter bei der Anwendung auf Mikrostrukturen das beste Ergebnis versprechen.

In weiterführenden Untersuchungen soll ein Vergleich beider Verfahren durch die Anwendung auf Mikrostrukturen erfolgen. Ziel ist es herauszufinden, bei welchen Parametern die Verfahren gleiche Ergebnisse liefern und inwiefern sich die Verfahren, bei der Wahl gleicher Parameter, voneinander unterscheiden. Für diese Untersuchungen werden Teststrukturen angefertigt, an denen die Auswirkungen der Glättungsverfahren verdeutlicht werden können.

Die Verfahren sollen anhand von Rauheitsmessungen, Veränderungen der Strukturgeometrie und der Prozessgeschwindigkeit charakterisiert werden. Des Weiteren soll ein direkter Vergleich eine verlässliche Aussage darüber liefern, welches Verfahren qualitativ bzw. quantitativ besser ist und mit welcher Präzession die erwünschten Ergebnisse erreicht werden können.

2 Grundlagen

2.1 Viskosität von Glas

Glas ist allgemein als unterkühlte Schmelze definiert, die erstarrt ist ohne zu kristallisieren. Aufgrund dessen hat Glas keine kristalline, sondern eine amorphe Struktur. Die Viskosität ist ein Maß der inneren Reibung von Flüssigkeiten [Lin06]. Bei Glas bzw. seiner Schmelze ist diese stark temperaturabhängig. Aus Abbildung 6 ist erkennbar, dass es keine Phasenumwandlung vom festen zum flüssigen Zustand gibt. Der Verlauf der Viskosität ist kontinuierlich, d.h. über eine definierte Temperatur kann die, z.B. für die Verarbeitung, gewünschte Viskosität erreicht werden. Entscheidender für den Zustand von Glas ist die Transformationstemperatur T_g . Unterhalb von T_g beträgt die Viskosität von Glas $\eta > 10^{13} \text{ dPa} \cdot \text{s}$ welches damit als Festkörper definiert ist [Fri77].

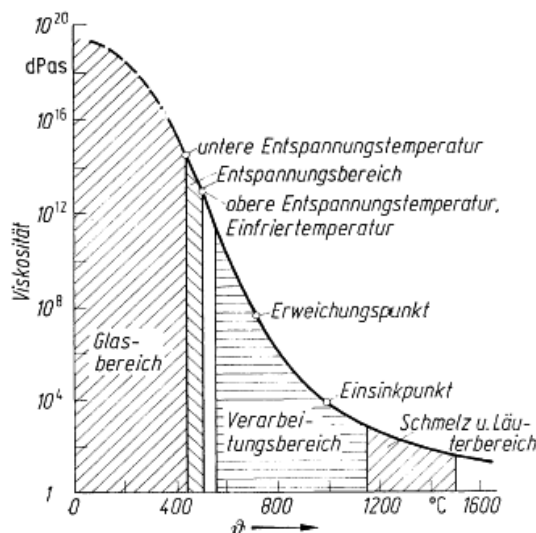


Abbildung 6: Viskositäts-Temperatur-Diagramm von Glas [Jeb11].

Wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt, unterscheidet man in verschiedene Viskositätsbereiche: Glasbereich, Entspannungsbereich, Verarbeitungsbereich, Schmelz- und Läuterbereich. Aufgrund der sehr großen Änderung der Viskosität bei relativ kleiner Temperaturänderung ist diese logarithmisch aufgetragen. Der Entspannungsbereich, oder auch kritischer Kühlbereich, wird begrenzt durch die obere und untere Entspannungstemperatur. Diese werden unter anderem auch als obere und untere Kühlttemperatur bezeichnet und begrenzen den Temperaturbereich in dem sich Spannun-

gen im Material in relativ kurzen Zeiten abbauen. Der Verarbeitungsbereich bzw. der Schmelz- und Läuterbereich ist für die Verarbeitung des Glases von Bedeutung.

2.2 Oberflächenspannung

Liegt Glas als Schmelze vor, kommt eine weitere Eigenschaft zum Vorschein. Vergleichbar mit Flüssigkeiten wirkt an der Grenzfläche der Schmelze die Oberflächenspannung. Sie wird von inneren Kräften hervorgerufen und wird auch als Grenzflächenspannung bezeichnet. Diese inneren Kräfte werden als Kohäsionskräfte bezeichnet und wirken zwischen den Molekülen der Flüssigkeit. Moleküle, die sich in der Flüssigkeit befinden, also deren Wirkungssphäre vollständig in der Flüssigkeit liegt und die somit allseitig von anderen Molekülen umgeben sind, erfahren diese Kräfte auch allseitig. Die Kraftwirkung ist von allen Seiten gleich groß, demzufolge ist die resultierende Kraft null (vgl. Abbildung 7, M_1).

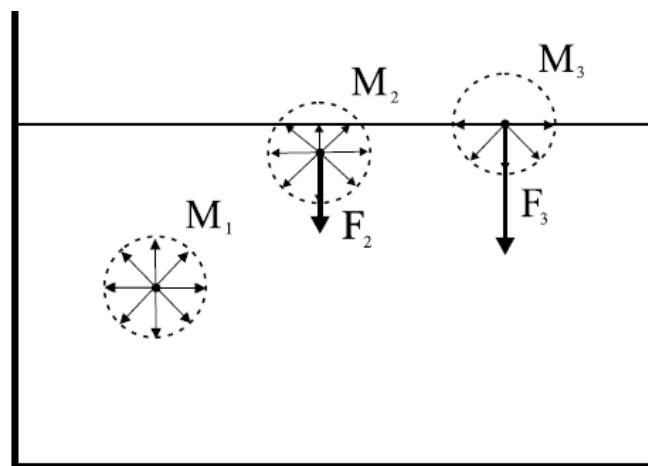


Abbildung 7: Kraftwirkung auf die Moleküle einer Flüssigkeit [Kre09].

Moleküle, die nicht allseitig von anderen Molekülen umgeben sind bzw. deren Wirkungssphäre nicht komplett in der Flüssigkeit liegt, erfahren diese Kräfte nicht allseitig. Die resultierende Kraft ist ins Innere der Flüssigkeit gerichtet (siehe Abbildung 7, M_3). Alle Moleküle der Grenzschicht üben auf die Flüssigkeit einen sogenannten Kohäsionsdruck aus, der bei Vergrößerung der Oberfläche überwunden werden muss. Um die Oberfläche zu vergrößern, müssen Moleküle vom Inneren der Flüssigkeit an die Oberfläche gebracht werden. Für die Änderung der Oberfläche ΔA muss eine, zur Oberflächenänderung proportionale, Arbeit ΔW aufgebracht werden [Kre09]. Die Oberflächenspannung σ kann somit als Proportionalitätsfaktor beschrieben werden:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Die Oberflächenspannung wird auch als spezifische Oberflächenenergie bezeichnet, eine Art potentielle Energie die in jeder Oberfläche enthalten ist. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass eine Flüssigkeit mit minimaler Oberfläche in einem energetisch minimalen Zustand ist. Die Wirkung der Oberflächenspannung führt zur Minimierung der Oberfläche, was gleichzeitig die Minimierung der Oberflächenenergie bedeutet [Kre09, Lin06].

2.3 Absorption von CO₂-Laserstrahlung im Quarzglas

Um eine Schmelze zu generieren, muss Energie im Material deponiert werden. Speziell für Quarzglas eignet sich CO₂-Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Allgemein gilt, dass die Summe aus reflektierter, absorbierter und transmittierter Strahlungsleistung der eingestrahlten Strahlungsleistung entspricht. Bezogen auf diese ergeben sich die materialspezifischen Parameter Reflexionsgrad R , Absorptionsgrad A und Transmissionsgrad T [Hüg92]. Es gilt:

$$R + A + T = 1 \quad (2.2)$$

Das Lambert-Beer'sche Gesetz beschreibt die Intensität I in der Tiefe z eines Materials, bei einer Ausgangsintensität I_0 . Der materialspezifische Absorptionskoeffizient α gibt dabei die Stärke des Intensitätsabfalls mit zunehmender Tiefe z an [Hüg92].

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (2.3)$$

Die Absorptionstiefe ist laut Definition die Tiefe z im Werkstück, bei der die Intensität auf das $1/e$ -fache abgefallen ist. Damit gilt für die Absorptionstiefe z_{abs} :

$$I(z) = \frac{I_0}{e} \quad (2.4)$$

Es ergibt sich somit:

$$z_{abs} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.5)$$

Ist die Dicke d des Materials größer als z_{abs} gilt: $T = 0$

$$R + A = 1 \quad (2.6)$$

In [Hec12] wird für Quarzglas eine Absorptionstiefe von $z_{abs}=11,5 \mu\text{m}$ angegeben, für eine Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$. Die Dicke der verwendeten Substrate ist $1,5 \text{ mm}$. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Strahlung, die in das Werkstück

einkoppelt, vollständig absorbiert wird. Der größte Teil wird dabei in der Tiefe bis rund $11,5\text{ }\mu\text{m}$ absorbiert. Weiterhin kann der transmittierende Anteil vernachlässigt werden, somit ergibt sich für den Absorptionsgrad A :

$$A = 1 - R \quad (2.7)$$

Der Reflexionsgrad R ist nicht nur von der Wellenlänge bzw. vom Material, sondern auch von der Polarisierung und dem Einfallswinkel abhängig. Der Einfallswinkel der Laserstrahlung ist durch den Versuchsaufbau vorgegeben und kann mit 0° angenommen werden. Geringe Winkeländerungen haben in dem Bereich einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Reflexionsgrad. In [Hec12] wird für $R(0^\circ)$ ein Reflexionsgrad von $R \approx 0,11$ angegeben. Laut (2.6) ergibt sich damit ein Absorptionsgrad von $A \approx 0,89$ bei senkrechtem Einfall.

2.4 Thermisches Glätten mit CO₂-Laserstrahlung

Das thermische Glätten mit CO₂-Laserstrahlung beruht auf den bereits beschriebenen Eigenschaften von Quarzglas und dessen Schmelze. Die Wechselwirkung der CO₂-Laserstrahlung mit der Quarzglasoberfläche führt, bedingt durch den hohen Absorptionsgrad, zum Erwärmen dieser. Der Anteil der Strahlungsleistung, der in das Material einkoppelt, wird aufgrund des hohen Absorptionskoeffizienten in einer wenige μm dicken Schicht absorbiert. Dies führt zum Erwärmen, bis hin zum Aufschmelzen dieser Schicht. Durch die Senkung der Viskosität kann die Oberflächenspannung wirken, was eine Umverteilung von Material zur Folge hat. Durch die Umverteilung minimiert sich die Oberfläche d.h. sie zieht sich glatt. Die Temperaturüberwachung erfolgt durch ein Pyrometer, dessen Messfleck in der Mitte des erzeugten Temperaturfeldes liegt. Die Überwachung der Temperatur spielt dabei eine sehr wichtige Rolle, da zum einen die Temperatur der Schmelze möglichst hoch gehalten werden soll und zum anderen kein Materialabtrag erfolgen darf. Die vorangegangenen Arbeiten von Kratsch [Kra11, Kra111] haben bereits gezeigt, dass eine erfolgreiche Glättung von mehreren Parametern abhängt. Mit Erhöhung der Temperatur verringert sich die Viskosität der Schmelze. Umso geringer die Viskosität ist, desto fließfähiger ist die Schmelze, d.h. die Oberflächenspannung kann stärker wirken, was den Glättungseffekt verstärkt. Die Interaktionszeit von Laserstrahl und Werkstückoberfläche hat ebenfalls einen großen Einfluss auf das Glättungsergebnis. Laut Richmann [Ric09] verbessert eine lange Interaktionszeit das Glättungsergebnis. Der große Nachteil einer langen Interaktionszeit ist jedoch, dass sich das Substrat zu stark erwärmt und sich aufgrund der Schwerkraft verformt. Des Weiteren kommt es im Quarzglassubstrat bei zu schnellem Erwärmen bzw. Abkühlen zu Spannungen. Diese thermisch induzierten Spannungen können zum Bruch

der Substrate führen [Kra11]. Der Erfolg einer Glättung wird anhand der messtechnischen Kenngröße S_q nach EN ISO 25178 bewertet. Es wurde bereits festgestellt, dass der Glättungserfolg umso größer ist, je geringer die Ausgangsrauheit ist. Oberflächenwellen mit hohen Frequenzen werden also besser geglättet als Oberflächenwellen mit niedrigen Frequenzen. Aufgrund des Tiefpassverhaltens bleibt nach der Glättung dennoch eine Restwelligkeit zurück [Ric09, Kra11].

2.5 Charakterisierung von Oberflächen

Oberflächen werden im Allgemeinen anhand der Abweichung der Ist-Form von der Soll-Form charakterisiert. Laut DIN 4760 :1982 werden Form- bzw. Gestaltabweichungen in sechs Ordnungen eingeteilt. Die 1.Ordnung beschreibt die Formabweichung einer Oberfläche und die 2. Ordnung deren Welligkeit. Die Ordnungen 3 und 4 sind als Rauheit aufzufassen und Ordnung 5 und 6 beschreiben die Gefügestruktur und den Gitteraufbau. Allgemein überlagern sich bei realen Oberflächen alle Ordnungen zur Ist-Oberfläche. Bei der Herstellung von optischen Elementen ist neben der Formgenauigkeit die Rauheit eine wichtige Größe, welche durch verschiedene Kennwerte angegeben werden kann. Der in der Industrie am häufigsten verwendete Rauheitswert ist der arithmetische Mittenrauwert R_a . Er entspricht der mittleren Abweichung des Oberflächenprofils vom Mittelwert und berechnet sich wie folgt:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad (2.8)$$

Der R_a -Wert sagt jedoch nur wenig über die Oberflächenbeschaffenheit aus, da Spitzen von Riefen nicht unterschieden werden. Die quadratisch gemittelte Rauheit R_q gibt die quadratisch gemittelte Abweichung der Profilordinaten an und reagiert im Vergleich zu R_a sensibler auf einzelne Spitzen und Riefen [Vol05].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \quad (2.9)$$

Die R -Werte beschreiben allgemein die Rauheit eines gemessenen Profils, d.h. einer Linie. Alternativ kann die Rauheit auch bezogen auf eine Fläche angegeben werden. Die quadratisch gemittelte Flächenrauheit S_q beschreibt die quadratisch gemittelten Abweichungen der Profilordinaten vom Mittelwert innerhalb der gemessenen Fläche.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (2.10)$$

Aus den Formeln für die verschiedenen Rauheitswerte ist erkennbar, dass als Grenzen für die Integrale die Längen der Messstrecken l_r , l_m und die Fläche A eingesetzt werden. Wird ein Oberflächenprofil als Überlagerung von Oberflächenwellen unterschiedlicher Wellenlängen betrachtet, vergrößert sich mit zunehmender Messstrecke die Wellenlänge der Oberflächenwellen die in die Messung einbezogen werden. Das bedeutet, je größer die Messstrecke ist, umso rauer erscheint im Allgemeinen die Oberfläche. Zwischen Rauheit und Welligkeit eines Profils gibt es keine definierte Grenze, sie kann vom Betrachter prinzipiell frei gewählt werden. Eine Möglichkeit die Rauheit von der Welligkeit zu trennen bieten Gaußfilter (im Folgenden als Filter bezeichnet). Durch diese Filter kann das Profil in Rauheit und Welligkeit getrennt werden, was aber die Angabe einer Grenzwellenlänge λ_c (engl. cut-off) erfordert. Die Grenzwellenlänge ist die Wellenlänge bei der eine Sinuswelle in ihrer Amplitude um 50 % reduziert wird. Das heißt, alle Oberflächenwellenlängen die kleiner als λ_c sind werden durch den Filter weniger stark gedämpft und nehmen somit größeren Einfluss auf den Rauheitswert. Dennoch nimmt die Rauheit mit Verringerung der Grenzwellenlänge ab, da im Allgemeinen Oberflächenwellen mit kleinen Wellenlängen kleine Amplituden haben. Der Einsatz von Filtern dient demnach der Trennung der Rauheit von der Welligkeit. Durch den Einsatz von verschiedenen Grenzwellenlängen kann die Wirkung von Oberflächenbehandlungen in bestimmten Größenordnungen (Oberflächenwellenlängenbereiche) ermittelt werden.

3 Material und Methoden

3.1 Corning 7980

Das Quarzglas Corning 7980 ist hochreines, amorphes Siliziumdioxid (SiO_2), synthetisch hergestellt durch Flammenhydrolyse. Es zeichnet sich durch einen hohen Transmissionsgrad vom ultravioletten (UV) bis in den nahen infraroten (IR) Spektralbereich aus. Durch die gute Transmission im UV-Bereich wird es z.B. für Linsensysteme in der Mikrolithografie eingesetzt [Kal12].

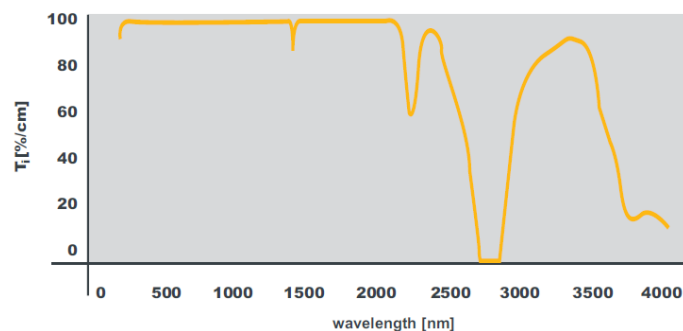


Abbildung 8: Transmissionskurve Corning 7980 [Cor13].

Wie schon in Kapitel 2.1 erwähnt, ist die Viskosität von Glas sehr stark temperaturabhängig. Der Viskosität-Temperatur-Verlauf ist außerdem noch abhängig von der Zusammensetzung des Glases, so ergeben sich für Corning 7980 andere Temperaturen als in Abbildung 6 dargestellt. Aus dem zugehörigen Datenblatt der Firma Corning können folgende Werte entnommen werden:

Tabelle 1: Auszug aus Datenblatt Corning 7980 [Cor13].

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Erweichungspunkt | 1585 °C (107,6 poises) |
| obere Kühltemperatur | 1042 °C (1013 poises) |
| unterer Kühlpunkt | 893 °C (1014.5 poises) |
| Wärmeleitfähigkeit | 1,30 W/m K |
| Temperaturleitfähigkeit | 0,0075 cm²/s |

Wenn nicht anders angegeben, alle Werte bei 25 °C.

Der Erweichungspunkt für Corning liegt bei einer Temperatur von $T_E = 1585\text{ °C}$. Es werden nur Untersuchungen mit Temperaturen oberhalb der Erweichungstemperatur T_E durchgeführt, da unterhalb dieser theoretisch kein Glättungseffekt eintreten sollte.

3.2 CO₂-Laser und Anlagenkomponenten

Die Realisierung der Versuche erfolgt mit einer CO₂-Laseranlage, welche mehrere Hauptkomponenten und optional einsetzbare Komponenten umfasst. Zu den Hauptkomponenten zählen der CO₂-Laser, das Pyrometer, die Laserleistungsregelung und ein Steuerrechner, der diese miteinander verbindet. Zu den optionalen Komponenten zählen einerseits ein Scanner und die dazugehörige Steuerung und andererseits eine Zylinderoptik in Verbindung mit einer Linearachse und deren Steuerung. Die Hauptkomponenten erfüllen demzufolge für jeden Aufbau die gleichen Aufgaben.

Für beide Versuchsaufbauten kommt der CO₂-Laser SM600P der Firma FEHA zum Einsatz, der bei einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ emittiert. Der Laser hat einen fünfmal gefalteten, 10,8 m langen Resonator und besitzt eine maximale Ausgangsleistung von 600 W bei einer Leistungsstabilität von $\pm 2 \%$. Der Laser ist ein Monomodelaser, dessen Intensitätsverteilung im Rohstrahl von 12 mm Durchmesser nahezu perfekt gaußförmig ist.



Abbildung 9: CO₂-Laser SM 600P der Firma FEHA [Kra11].

Der Laser kann sowohl gepulst als auch kontinuierlich betrieben werden, für die Versuche wird der Laser ausschließlich kontinuierlich betrieben. Des Weiteren kann die Laserleistung über eine Referenzspannung von 0 bis +10 V geregelt werden.

Die Laserleistungsregelung wird von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen, welche die vom Pyrometer gemessenen Werte in die oben bereits erwähnte Referenzspannung für den Laser umrechnet. Dabei erfolgt ein ständiger Abgleich von Soll- und Ist-Temperatur. Anhand der Differenz wird die benötigte Laserleis-

tung zum weiteren Aufheizen des Materials bereitgestellt. Über die Regelungsparameter K_P und t_n kann auf die Leistungsregelung Einfluss genommen werden.

Die Temperatur wird mit dem Pyrometer Sensortherm MY51 gemessen. Das Pyrometer hat ein fokussierbares Objektiv zur Variation des Messabstandes von 110 bis 200 mm und misst bei einer Wellenlänge von $\lambda = 5,14 \mu m$. Quarzglas hat in diesem Spektralbereich einen hohen Emissionskoeffizienten. In [Her09] wird für Quarzglas ein Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,97$ angegeben. Der durch Hecht [Hec12] ermittelte Emissionsgrad für die Wellenlänge von $\lambda = 5,14 \mu m$ liegt, für einen Temperaturbereich von $T = 1900 - 2000 \text{ } ^\circ C$, bei $\varepsilon = 0,98$. Im zugehörigen Datenblatt von Corning 7980 ist kein Emissionsgrad angegeben, daher wird dieser durch eine Referenzmessung mit dem von Kratsch [Kra13] verwendeten Pyrometer durchgeführt.

Dem Steuerrechner kommen hauptsächlich zwei Aufgaben zu. Die Laserleistungsregelung bildet mit Laser und Pyrometer einen Regelkreis, benötigt jedoch ein Trigger-Signal zur Freigabe der Laserstrahlung. Dieses Trigger-Signal kann über den Steuerrechner abgesetzt werden. Des Weiteren kann mit dem Rechner und der entsprechenden Software die Aufzeichnung der Temperatur erfolgen, was für die Auswertung und vor allem für die Optimierung des Prozesses von Bedeutung ist.

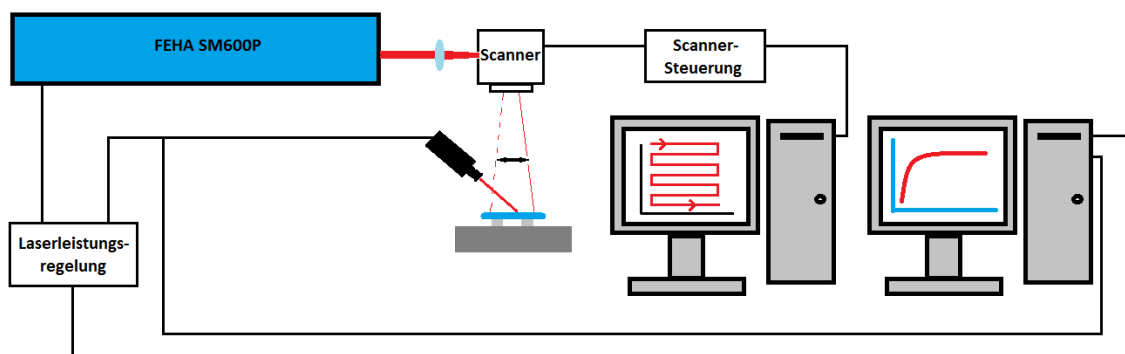


Abbildung 10: schematische Darstellung der Laseranlage mit Scanner.

Die bereits erwähnten optionalen Komponenten dienen der Realisierung von zwei Versuchsaufbauten. In Abbildung 10 ist die Versuchsanordnung mit dem Scanner schematisch dargestellt. Die Bewegung des Laserstrahls wird über eine separate Scanner-Steuerung in Verbindung mit einem Steuerrechner realisiert und ist unabhängig von der Leistungsregelung des Lasers. Für die Bearbeitung der Substrate ist es in diesem

Fall nicht notwendig die Komponenten zeitlich zu synchronisieren, jedoch erfolgt die Freigabe des Laserstrahls erst wenn der Scanner in Bewegung ist.

Der zweite Versuchsaufbau erfordert hingegen mehr steuerungstechnischen Aufwand, da die eingesetzte Linearachse in ihrer Bewegung mit dem Laserstrahl im Startzeitpunkt synchronisiert werden muss bzw. ein definiertes Einschalten der Laserstrahlung erfolgen soll.

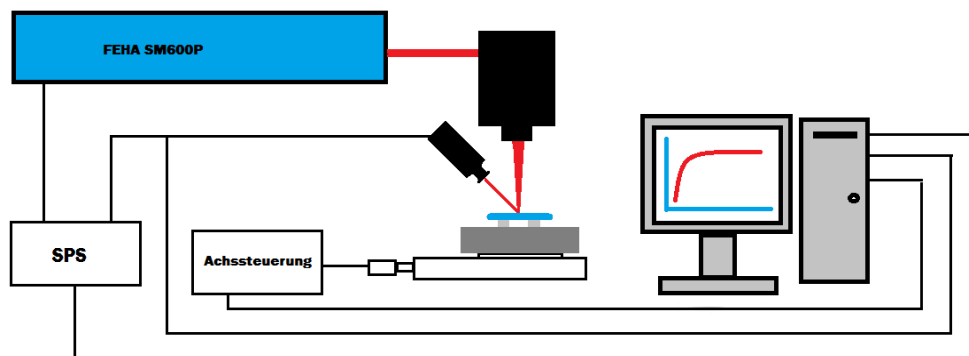


Abbildung 11: schematische Darstellung der Laseranlage mit Zylinderoptik und Linearachse.

In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass alle Komponenten von einem Steuerrechner aus bedient werden können. Über ein Programm können alle Funktionen miteinander synchronisiert werden. Zusätzlich ist ein temperatur- und zeitgesteuertes Zu- und Abschalten des Lasers und der Achsbewegung möglich. Diese Steuerungsfunktionen sind für den Scanneraufbau ebenfalls von Bedeutung, da so ein Überschreiten der Solltemperatur verhindert werden oder eine bestimmte Interaktionszeit eingehalten werden kann.

3.3 Glätten mittels Zylinderlinse

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Kratsch [Kra11, Kra111] und Richmann [Ric09], die mit einem scannenden Verfahren arbeiten, wird bei diesem Glättungsverfahren eine Zylinderlinse als Optik verwendet. Durch die Zylinderlinse wird die Laserstrahlung auf der Werkstückoberfläche in Form einer Linie fokussiert. Bei der Wechselwirkung von CO₂-Laserstrahlung mit der Quarzglasoberfläche wird ein Großteil der Laserstrahlung in einer wenige µm dünnen Schicht absorbiert [Hec12, Ric09]. Dies führt folglich zur Erwärmung des Materials, was bei genügend hoher Intensität zum Aufschmelzen dieser Schicht führt. Das Substrat wird mittels einer Linearachse mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f unter dem Laserstrahl hindurchbewegt.

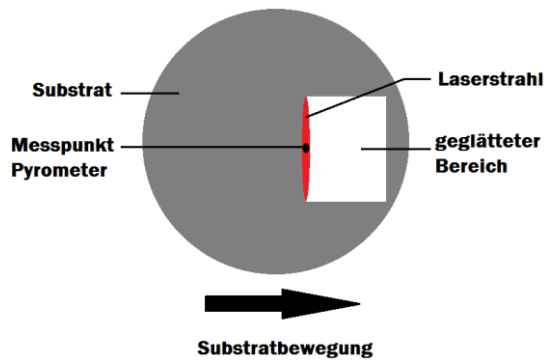


Abbildung 12: Schema Glätten mit Zylinderlinse.

Durch die Oberflächenspannung der Schmelze kommt es zu einer Umverteilung von Material und die Oberfläche zieht sich glatt. Der Grad der Glättung hängt maßgeblich von der Maximaltemperatur und von der Interaktionszeit ab. Die Interaktionszeit t_{int} lässt sich über die Vorschubgeschwindigkeit v_f bzw. über die Defokussierung z einstellen und kann mit der Gleichung

$$t_{int} = \frac{2w(z)}{v_f} \quad (3.1)$$

abgeschätzt werden [Ric09]. Wobei $2w$ die Breite der Fokuslinie ist, da der Laserstrahl nur in einer Richtung fokussiert wird. Die Breite w lässt sich mit der Kenntnis der Strahlqualitätskennzahl k , der Wellenlänge λ , dem Strahlradius w_0 und dem Abstand z vom Fokus nach der Gleichung

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(z \cdot \frac{\lambda}{k \cdot \pi \cdot w_0^2}\right)^2} \quad (3.2)$$

berechnen [Las13]. Durch den runden Querschnitt des Rohstrahls entsteht im Fokus keine exakte Linie, sondern eine flache Ellipse [Sch86]. Der Laserstrahl besitzt nach der Zylinderlinse keine rotationssymmetrische gaußförmige Intensitätsverteilung mehr, jedoch ist die Intensitätsverteilung über die Länge und Breite des elliptischen Querschnitts dennoch gaußförmig verteilt.

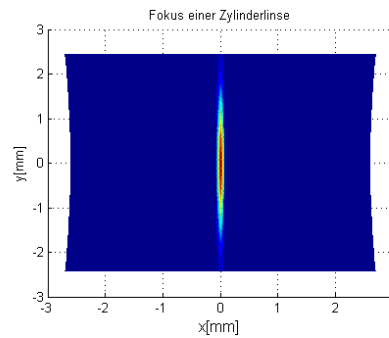


Abbildung 13: qualitative Darstellung der Intensitätsverteilung im Fokus einer Zylinderlinse.

Aufgrund des elliptischen Strahlquerschnittes ist die Interaktionszeit nicht eindeutig bestimmbar, alternativ kann zur Charakterisierung die Vorschubgeschwindigkeit v_f als Parameter herangezogen werden. Aus der Vorschubgeschwindigkeit und der geglätteten Breite b der Glättungsspur kann die Prozessgeschwindigkeit, des Weiteren als Flächenrate FR bezeichnet, mittels der Gleichung

$$FR_z = b \cdot v_f \quad (3.3)$$

berechnet werden. Der Index Z kennzeichnet die Flächenrate für das Zylinderlinsen-Verfahren.

Die Temperatur an der Oberfläche wird über ein Pyrometer gemessen. Der Messfleck, mit einem minimalen Durchmesser von $d_{min} = 0,8 \text{ mm}$ wird in die Mitte der entstehenden Ellipse gelegt, um die Maximaltemperatur zu erfassen. Aufgrund der hohen Spitzenintensitäten im Fokus muss der Laserstrahl defokussiert werden, da das Material sonst sofort verdampft. In der vorangegangenen Arbeit [Büt13] wurde für die optimale Defokussierung ein Wert von 11 mm ermittelt. Für die Breite der Ellipse ergibt sich somit aus (3.2) ein Wert von $2w = 5,28 \text{ mm}$. Dies ist ausreichend um das Verdampfen zu verhindern und eine zuverlässige Temperaturmessung zu gewährleisten [Büt13].

Die Temperaturverteilung im Material ist aufgrund der Intensitätsverteilung im Laserstrahl sehr inhomogen. Demzufolge ist der Glättungseffekt nur in der Mitte des überfahrenen Bereichs als gleichmäßig zu erachten.

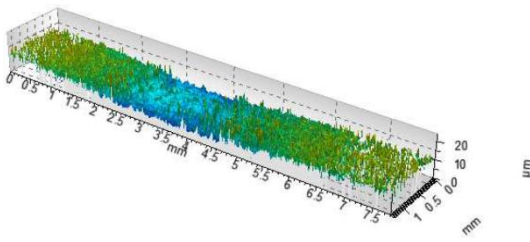


Abbildung 14: Glättungsbereich auf einer aufgerauten Corningscheibe, $T_{\max}=1900\text{ °C}$, $v_f=2\text{ mm/s}$.

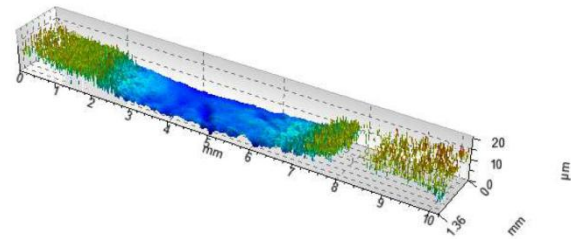


Abbildung 15: Glättungsbereich auf einer aufgerauten Corningscheibe, $T_{\max}=2200\text{ °C}$, $v_f=2\text{ mm/s}$.

Des Weiteren hängt die Größe des Glättungsbereiches von der erreichten Maximaltemperatur ab. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen eine deutliche Vergrößerung des geglätteten Bereichs mit steigender Temperatur. Bei der Anwendung des Verfahrens auf Mikrostrukturen ist darauf zu achten, dass diese dabei in dem homogenen Glättungsbereich liegen, d.h. unter Berücksichtigung der Randbereiche sowie der Anfahr- und Bremsstrecke der Linearachse. Andernfalls ist mit einer ungleichmäßigen Glättung der Struktur zu rechnen.

3.4 Glätten mittels Scanner

Durch den Einsatz eines Scanners kann mit dem Laserstrahl ein weitaus größerer Bereich erwärmt werden als mit der Zylinderlinse. Die Dauer des Aufheizprozesses ist dabei jedoch umso länger, je größer die aufzuheizende Fläche ist. In den Arbeiten von Kratsch [Kra11, Kra13] wird davon abgeraten eine größere Fläche als $2,5 \times 2,5\text{ cm}^2$ zu bearbeiten, da die langen Interaktionszeiten von Laserstrahl und Substrat zu einer starken Substratverformung führen. Die fokussierende Optik mit einer Brennweite von $f = 254\text{ mm}$ befindet sich vor dem Scanner, der Fokus ca. 100 mm unter diesem. Der Laserstrahl muss für die Bearbeitung defokussiert werden um ein Verdampfen des Materials aufgrund zu hoher Spitzenintensitäten zu verhindern. Um ein möglichst homogenes Temperaturfeld zu erzeugen kann die zu glättende Fläche, wie in Abbildung 16 dargestellt, mäanderförmig abgerastert werden. Dabei sollte der Laserstrahl in seinem Querschnitt so groß sein, dass sich die Bahnen überlappen. Kratsch [Kra11] empfiehlt den Laserstrahl so weit zu defokussieren, bis der Strahldurchmesser im Bereich von $d_L = 1 - 2\text{ mm}$ liegt. Der empfohlene Bahnabstand beträgt $q = 1\text{ mm}$. Dies, in Verbindung mit einer großen Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls von $v_s = 1000 - 2000\text{ mm/s}$ und dem mehrmaligen Abrastern der Fläche, führt zu einer relativ gleichmäßigen Erwärmung des Bereichs [Kra11, Kra13]. Das entstehende Temperaturfeld ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt. Dadurch, dass sich die fokus-

sierende Optik vor dem Scanner befindet kommt es bei der Auslenkung des Laserstrahls zu einer Änderung der Fokusslage. Mit größer werdendem Ablenkwinkel verschiebt sich der Fokus zunehmend über die Substratoberfläche. Der bereits defokussierte Laserstrahl wird dadurch mit zunehmender Auslenkung zusätzlich defokussiert. Dies könnte sich möglicherweise auf das Temperaturfeld auswirken, da sich die Intensität zu den Randbereichen hin verringert. Des Weiteren sollte der nicht ausgelenkte Laserstrahl in der Mitte des abgescannten Bereichs liegen. Anderweitig ist mit einer Verschiebung des Temperaturmaximums zu rechnen.

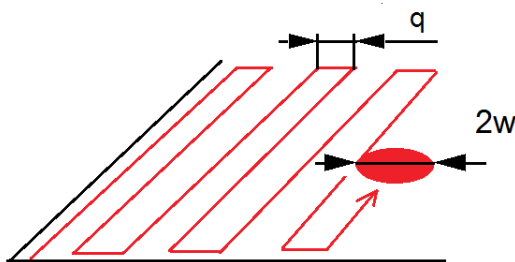


Abbildung 16: Mäanderbahn des Laserstrahls beim Abrastern des zu glättenden Bereichs nach Kratsch [Kra11].

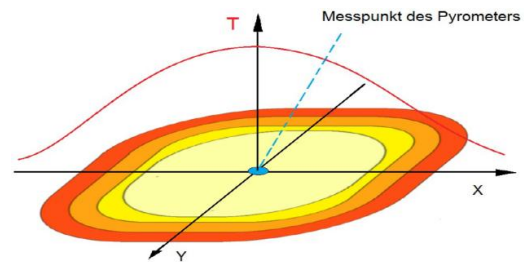


Abbildung 17: entstehendes Temperaturfeld bei Abrasterung mit einem Scanner [Kra11].

Wie bereits erwähnt wird die Temperatur über ein Pyrometer gemessen, dessen Messfleck in der Mitte des Temperaturfeldes liegen sollte (vgl. Abbildung 17). Entsprechend der Temperaturverteilung im Material wird eine dünne Schicht an der Oberfläche aufgeschmolzen und durch die Oberflächenspannung zieht sich die Oberfläche glatt. Bei der Anwendung des Verfahrens auf Mikrostrukturen ist darauf zu achten, dass die Struktur ebenfalls in der Mitte des Temperaturfeldes liegt um einerseits eine gleichmäßige Glättung zu realisieren und andererseits die korrekte Temperatur, die im Bereich der Struktur wirken soll, einstellen zu können. Anders als beim Zylinderlinsen-Verfahren ist mit einer wesentlich größeren Aufwärmzeit zu rechnen. Die von Kratsch aufgenommenen Temperaturkurven sind in Abbildung 18 dargestellt. Durch die Verwendung eines anderen Pyrometers ist mit einer kürzeren Erwärmungszeit zu rechnen, da dieses Pyrometer eine geringere Einstellzeit hat und demzufolge die Laserleistungsregelung insgesamt schneller reagieren kann.

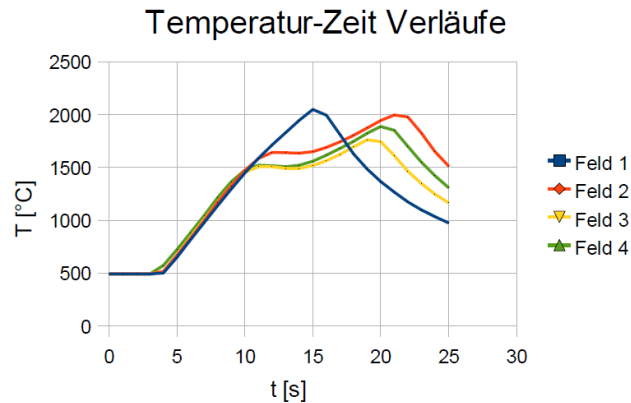


Abbildung 18: Temperatur-Zeit-Verläufe Scanner-Verfahren [Kra13].

Dieses Verfahren kann außerdem anhand der Flächenrate FR_s charakterisiert werden, welche sich aus der geglätteten Fläche A und der absoluten Aufwärmzeit t_{abs} nach der Gleichung

$$FR_s = \frac{A}{t_{abs}} \quad (3.4)$$

ergibt. Der Index S kennzeichnet die Flächenrate für das Scanner-Verfahren.

3.5 Teststrukturen

Beide Glättungsverfahren haben ein relativ großes Parameterfeld bezogen auf die Temperatur und die Interaktionszeit. Um eine Aussage über die Wirkung der einzelnen Parameter machen zu können, werden an aufgerauten Quarzglasscheiben Glättungsfelder erzeugt. Durch eine anschließende Rauheitsmessung kann so für jedes Verfahren das Parameterfeld eingegrenzt werden, in dem eine Anwendung auf Mikrostrukturen sinnvoll ist.

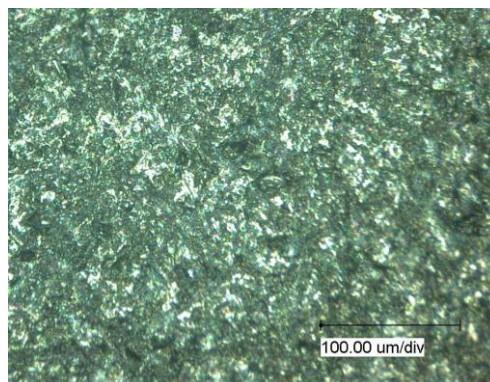


Abbildung 19: Corningsscheibe aufgeraut.

Für den Zylinderlinsenaufbau werden Testfelder für die Vorschubgeschwindigkeiten von $v = 1 - 10 \text{ mm/s}$ und Temperaturen von $T = 1600 - 2100 \text{ °C}$ erzeugt, jeweils in 1 mm/s - bzw. 100 °C - Schritten. Der Temperaturbereich ist für den Scanner-Aufbau aufgrund der Werkstoffeigenschaften der gleiche wie beim Zylinderlinsen-Verfahren. Da die Interaktionszeit für den Zylinderlinsenaufbau nicht eindeutig bestimmt werden kann, wird von der maximalen Interaktionszeit ausgegangen. Damit ergibt sich ein Bereich von $t_{int} = 0,53 - 5,28 \text{ s}$. Die Interaktionszeit wurde über die Gleichungen (3.1) , (3.2) und die oben genannten Vorschubgeschwindigkeiten ermittelt. Für das Scanner-Verfahren soll ebenfalls der Einfluss der Interaktionszeit auf das Glättungsergebnis untersucht werden. Des Weiteren ist zu klären, in welchen Bereichen die Verfahren steuerungstechnisch kontrollierbar sind, um definierte Ergebnisse zu erhalten bzw. deren Wiederholbarkeit zu garantieren.

Mit dem Ziel eines der beiden Verfahren letztendlich auf DOEs anwenden zu können, wurden zwei Arten von Teststrukturen auf einer Scheibe aus Corning 7980 Teststrukturen hergestellt, die den DOEs in Form und Größe ähneln. Die Teststrukturen a bis c sind Gitterstrukturen, welche mittels Fluorlasermikrostrukturierung hergestellt wurden. Durch den zeilenweisen Abtrag in X- und Y-Richtung entstehen drei Höhenstufen, wie in Abbildung 20 erkennbar ist. Nach der Strukturierung werden die Proben im Ethanol-Ultraschallbad gereinigt und in Kaliumhydroxid-Lauge geätzt, um den größten Teil, des bei der Fertigung entstehenden Debris, zu entfernen. Das Debris kann dadurch jedoch nicht vollständig beseitigt werden. In Abbildung 20 (roter Kreis) ist das verbliebene Debris an den Kanten der Struktur zu erkennen. Durch den Glättungsprozess soll dies beseitigt werden.

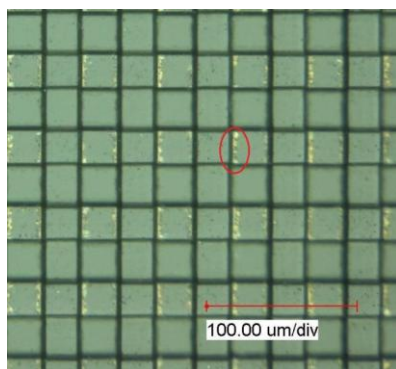


Abbildung 20: Mikroskopaufnahme der mittels Fluorlaser hergestellten Teststruktur

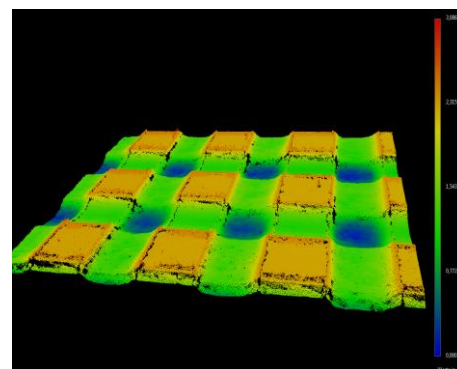


Abbildung 21: Konfokalmikroskop-aufnahme Strukturausschnitt.

Weiterhin soll anhand dieser Teststruktur die Auswirkung des Umschmelzprozesses bezüglich der Rauheit der bearbeiteten Bereiche und der Kantenverrundung ermittelt werden. Die Strukturen wurden in zwei Ausführungen hergestellt und variieren dabei in der Tiefe bzw. in den Abständen der verschiedenen Höhenstufen. Durch Schwankungen des Lasers während der Herstellung ist die Struktur 1b jedoch nicht identisch mit der Struktur 1a und daher anders gekennzeichnet.

Tabelle 2: Herstellungsparameter der Gitterstruktur Probe 1.

| Struktur | Typ 1a | Typ 1b | Typ 1c | Typ 1c |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Größe | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² |
| Stegbreite | 25 µm | 25 µm | 25 µm | 25 µm |
| Fluenz | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 4 J/cm ² | 4 J/cm ² |
| Pulsüberlappung | 95% | 95% | 95% | 95% |
| 1. Höhenstufe | -0,977 (±0,061) µm | -0,78 (±0,103) µm | -3,643 (±0,112) µm | -3,469 (±0,111) µm |
| 2. Höhenstufe | -1,82 (±0,155) µm | -1,45 (±0,072) µm | -7,044 (±0,106) µm | -6,793 (±0,144) µm |

Die zweite Teststruktur ist ein einfaches Bohrlochraaster. Die Anordnung der 25 x 25 µm großen Bohrungen erfolgt in einem Abstand von 25 µm auf einer Fläche von 2,5 x 2,5 mm. An dieser Art von Strukturen soll vor allem der Glättungserfolg in der Tiefe einzelner Bohrungen untersucht werden. Durch Änderungen im Verlauf der Flanken bzw. der Bohrlochgeometrie kann eine Aussage getroffen werden, inwieweit die Verfahren die Geometrie der Strukturen beeinflussen. In Abbildung 22 ist ein solches Bohrlochraaster dargestellt.

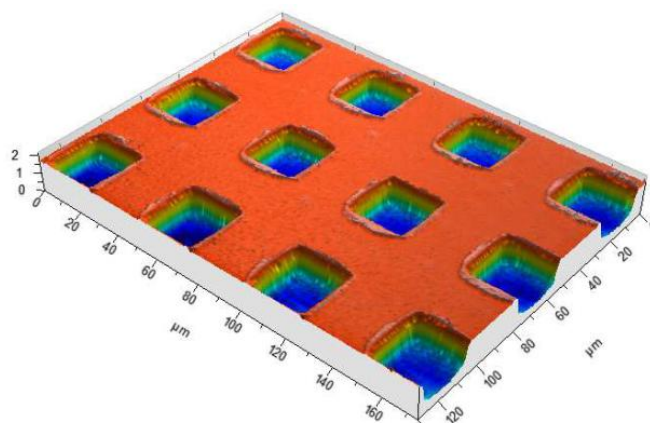


Abbildung 22: 3D-Darstellung eines Bohrlochrasters.

Für jedes Verfahren wurde eine Probe mit vier Gitterstrukturen und sechs Bohrlochraastern erstellt, um die Wirkung auf solche Strukturen miteinander vergleichen zu können. Vor dem Glätten wurden von jedem Feld die Bohrungstiefen vermessen und anhand

ihrer Tiefe kategorisiert. Jede Struktur vom gleichen Typ und annähernd gleicher Tiefe trägt die gleiche Bezeichnung.

Tabelle 3: Herstellungsparameter der Bohrlochraster Probe 1.

| Struktur | Typ 2a | Typ 2b | Typ 2b | Typ 2b | Typ 2c | Typ 2d |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Größe Testfeld | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² |
| Größe Bohrung | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² |
| Pulszahl | 2 | 2 | 8 | 8 | 16 | 16 |
| Fluenz | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 1,5 J/cm ² |
| Höhenstufe [µm] | -0,166 (±0,01) µm | -0,515 (±0,021) µm | -0,512 (±0,022) µm | -0,556 (±0,028) µm | -0,758 (±0,033) µm | -1,208 (±0,036) µm |

Für die zweite Probe ergaben sich jedoch aufgrund abweichender Herstellungsparameter größere Strukturturen als für die erste Probe. Die Herstellungsparameter und Größenordnungen sind in Tabelle 2 bis Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 4: Herstellungsparameter Gitterstruktur Probe 2.

| Struktur | Typ 3a | Typ 3a | Typ 3b | Typ 3b |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Größe | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² |
| Stegbreite | 25 µm | 25 µm | 25 µm | 25 µm |
| Fluenz | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 6 J/cm ² | 6 J/cm ² |
| Pulsüberlappung | 95% | 95% | 95% | 95% |
| 1. Höhenstufe | -1,78 (±0,14) µm | -1,78 (±0,07) µm | -4,82 (±0,13) µm | -4,83 (±0,11) µm |
| 2. Höhenstufe | -3,572 (±0,169) µm | -3,435 (±0,149) µm | -9,305 (±0,210) µm | -9,342 (±0,161) µm |

Tabelle 5: Herstellungsparameter der Bohrlochraster Probe 2.

| Struktur | Typ 4a | Typ 4b | Typ 4c |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Größe | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² | 2,5 x 2,5 mm ² |
| Größe Bohrung | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² | 25 x 25 µm ² |
| Pulszahl | 2 | 8 | 16 |
| Fluenz | 1,47 J/cm ² | 1,85 J/cm ² | 1,85 J/cm ² |
| Höhenstufe | -0,154 (±0,016) µm | -0,694 (±0,024) µm | -1,578 (±0,055) µm |

Um eine eindeutigen Bezug zu den Strukturen herzustellen wurden diese von 1 bis 4 durchnummeriert. Die Strukturen 1 und 2 werden mit dem Zylinderlinsen-Verfahren behandelt, die Strukturen 3 und 4 dementsprechend mit dem Scanner-Verfahren.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Charakterisierung der Verfahren

4.1.1 Eigenschaften des Zylinderlinsen-Verfahren

In Kapitel 3.3 wurde das Verfahren hinsichtlich seiner Wirkung bereits beschrieben und gewisse Anforderungen verdeutlicht. Die Forderung, zu glättende Strukturen in einen möglichst homogenen Glättungsbereich zu legen, stellt einen Anspruch an die Temperatursteuerung dar. Um entlang des mit dem Laser überfahrenen Bereichs ein homogenes Glättungsergebnis zu erhalten, muss die Temperatur über die gesamte Verfahrstrecke konstant gehalten werden. Ein, aus vorherigen Arbeiten, für optimal befundener Temperatur-Verlauf ist in Abbildung 23 dargestellt.

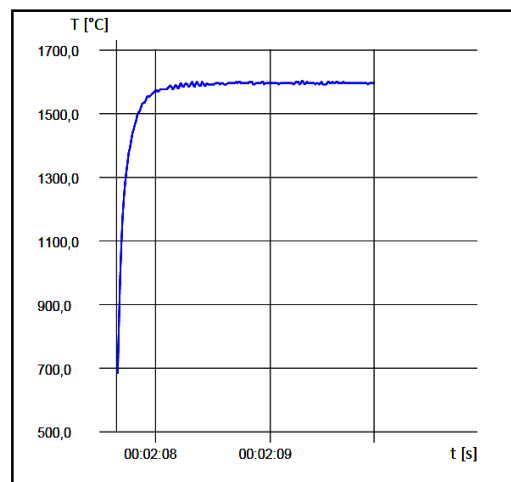


Abbildung 23: optimaler Temperaturverlauf beim überfahren des Glättungsbereichs.

Prinzipiell ist ein solcher Temperaturverlauf nur bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 5 \text{ mm/s}$ realisierbar. Bei höheren Geschwindigkeiten der Achse kann die Solltemperatur nicht korrekt eingehalten werden. Es ergeben sich im Allgemeinen drei ungünstige Temperaturverläufe beim Überfahren der zu glättenden Bereiche. In Abbildung 24 sind diese schematisch dargestellt.

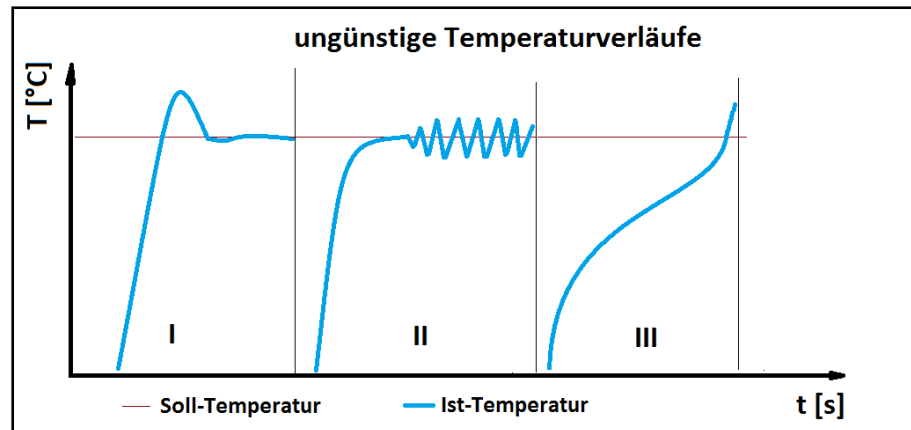


Abbildung 24: Temperaturverläufe die zu einer inhomogenen Glättung führen.

Im Fall I handelt es sich um eine Überhöhung bzw. eine Überkompensation der Temperatur am Anfang der Überfahrt und im Fall II um ein Pendeln der Ist-Temperatur um den Sollwert. Beide Fälle wurden ebenfalls in der vorangegangenen Arbeit [Büt13] diskutiert und sollen nicht weiter betrachtet werden. Fall III tritt erst bei Vorschubgeschwindigkeiten $v_f > 5 \text{ mm/s}$ auf und kann als Unterkompensation verstanden werden. Dieser Temperaturverlauf kann durch den Sachverhalte erklärt werden, dass aufgrund der geringen Interaktionszeit von Laserstrahl und Werkstück in diesem Bereich nur eine begrenzte Menge Strahlung absorbiert wird. Die Leistungsregelung kompensiert dies, indem sie die Ausgangsleistung des Lasers auf 100 % regelt. Die Erhöhung der Leistung hat eine Erhöhung der Intensität im Laserstrahl zur Folge, was sich im defokussierten Laserstrahl nur schwach äußert und nur zu einem langsamen Ansteigen der Temperatur führt. Die maximale Laserleistung ist in diesem Fall die begrenzen- de Größe. Durch eine stärkere Fokussierung kann zwar die Intensität auf dem Werkstück erhöht werden, jedoch ist dies aus den in Kapitel 3.3 bereits genannten Gründen nicht sinnvoll.

Die Geometrie der erzeugten Glättungsfelder ist bei diesem Verfahren abhängig von der Form und Intensitätsverteilung des Laserstrahls sowie von der Bahn die von Laserstrahl überfahren wird. Der resultierende Glättungsbereich ist aufgrund der geradlini- gen Bewegung durch die Linearachse rechteckig und kann auch als Glättungsspur beschrieben werden. Die Breite dieser Spur ist, wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, von der eingesetzten Maximaltemperatur abhängig. Die Länge der Spur kann beliebig lang sein und ist in diesem Sinne nur von der Größe des Substrates abhängig. Die Ränder der Glättungsspuren weisen einen kontinuierlichen Rauheitsverlauf in Richtung nicht geglätteter Bereiche auf, d.h. sie können nur sehr ungenau vermessen werden. Aus

den Untersuchungen zum Zylinderlinsen-Verfahren [Büt13] ist zu entnehmen, dass die Breite der Spuren nicht von der Vorschubgeschwindigkeit abhängt. Aufgrund dessen wurde repräsentativ die Spuren, die mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 5 \text{ mm/s}$ hergestellt wurden, vermessen (siehe Abbildung 25, Tabelle 6).

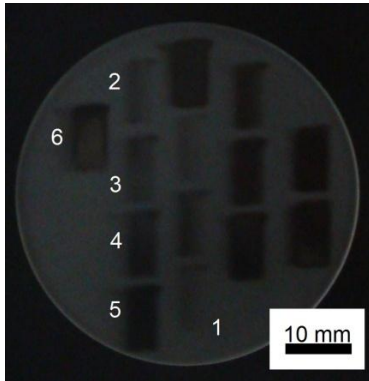


Abbildung 25: Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren erzeugte Glättungsfelder.

Tabelle 6: Temperaturen und Spurbreiten der mit $v_f=5 \text{ mm/s}$ hergestellten Testfelder (s. Anl.4.4.1-1).

| Feld | T [°C] | Spurbreite [mm] | Sandartabw. |
|------------------------|--------|------------------|-------------|
| 1 | 1600 | - | - |
| 2 | 1700 | 1,26 | 0,095 |
| 3 | 1800 | 3,43 | 0,168 |
| 4 | 1900 | 4,06 | 0,094 |
| 5 | 2000 | 4,75 | 0,062 |
| 6 | 2100 | 5,33 | 0,118 |
| Einstellzeit $t_n=0,2$ | | Dämpfung KP=2,75 | |

Die ermittelten Spurbreiten sind in Tabelle 6 aufgetragen. Die Felder wurden unter Verwendung eines Auflichtmikroskops vermessen. Für das Testfeld 1 konnten aufgrund der zu geringen Glättungswirkung keine eindeutigen Messwerte erfasst werden. Der Bereich ist zwar erkennbar, aber unter dem Mikroskop kaum vom Rest der Probe abzugrenzen. Für das Feld, dass mit einer Temperatur von $T = 2100 \text{ °C}$ geglättet wurde, wurde die Spur quer zur Vorschubrichtung auf der Rückseite der Probe vermessen.

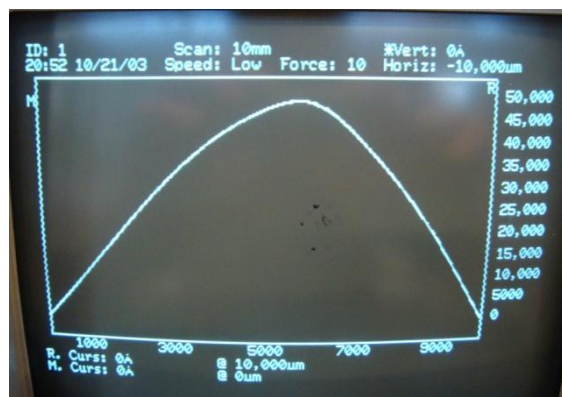


Abbildung 26: Substratverformung bei einer Maximaltemperatur von $T=2100 \text{ °C}$.

Durch die hohe Temperatur kommt es zur Verformung des Substrates.

4.1.2 Abschätzen der optimalen Glättungsparameter für das Zylinderlinsen-Verfahren

Die hergestellten Testfelder wurden mit einem Konfokalmikroskop untersucht und die jeweilige quadratisch gemittelte Flächenrauheit S_q ermittelt. Um das ganze Parameterfeld abzudecken, wurden mehrere Proben angefertigt. Durch das undefinierte Aufrauhlen der Oberfläche besitzt jede Probe eine andere Ausgangsrauheit. In den Arbeiten von Kratsch [Kra11] und Richmann [Ric09] wurde bereits festgestellt, dass die erreichbare Rauheit von der Ausgangsrauheit abhängt. Aus diesem Grund wurden die gemessenen Rauheiten auf den jeweiligen Ausgangswert normiert. Je kleiner die Werte für $S_{q_{nach}}/S_{q_{vor}}$ sind, desto geringer ist die erreichte Rauheit. Die ermittelte Ausgangsrauheit der Proben beträgt im Mittel $S_q = 0,895 \mu m \pm 0,071 \mu m$. Nach der Glättung wurden die Felder mehrmals vermessen und auf den jeweiligen mittleren Rauheitswert der Probe normiert. In Abbildung 27 sind die jeweiligen normierten Rauheitsverläufe für drei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt.

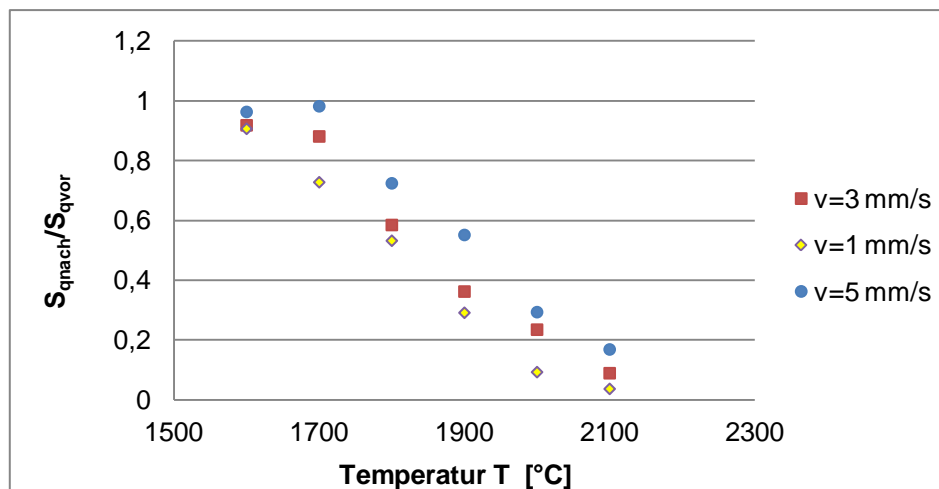


Abbildung 27: Normierte Rauheit für verschiedene Temperaturen und Vorschubgeschwindigkeiten (s. Anl.4.1.2-1).

Anhand Abbildung 27 ist zu erkennen, dass die Rauheit der Felder, bezogen auf die Ausgangsrauheit, mit zunehmender Temperatur abnimmt. Durch die Erhöhung der Temperatur wird die Viskosität der Schmelze herabgesetzt, was die Umverteilung von Material aufgrund der Oberflächenspannung begünstigt. Mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit verschiebt sich der Rauheitsverlauf in Richtung höherer Temperaturen, was durch die Verringerung der Interaktionszeit zu begründen ist. Die Interaktionszeit bestimmt gewissermaßen wie lange sich das Material im geschmolzenen Zustand befindet und demnach auch, wie viel Zeit das Material zur Umverteilung hat. Für eine

Temperatur von $T = 2100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1\text{ mm/s}$ konnte im Mittel eine Flächenrauheit von $S_q = 34\text{ nm}$ erreicht werden. Dieser Wert ist höher als der in der vorangegangenen Arbeit [Büt13] angegebene Wert von $S_q = 10\text{ nm}$, welche unter Verwendung eines Formfilters ermittelt wurde. Einerseits wird das Ergebnis durch den Filter beeinflusst, andererseits kann dies durch die unterschiedliche Ausgangsrauheit der verwendeten Proben erklärt werden. Dem sei hinzuzufügen, dass die Oberflächen der Proben, bezogen auf die Rauheit, nicht homogen sind. Für weitere Untersuchungen wurden die vermessenen Oberflächen mittels Welligkeitsfiltern behandelt, um die Wirkung von Temperatur und Interaktionszeit auf bestimmte Oberflächenwellen zu untersuchen. Wie in Kapitel 2.5 bereits beschrieben trennt ein solcher Filter die Welligkeit von der Rauheit. Mit Verkleinerung der Grenzwellenlänge werden somit die kleineren feinen Rauheiten betrachtet. Dadurch kann die Wirkung des Verfahrens auf die unterschiedlichen Rauheiten untersucht werden. Für die Untersuchungen wurden die Gaußfilter der zum Konfokalmikroskop gehörigen Analyse-Software verwendet, deren Grenzwellenlängen nach ISO 11562 normiert sind. Die Oberflächenprofile der aufgerauten Corningsscheiben wurden mit vier verschiedenen Grenzwellenlängen gefiltert. Die ermittelten Rauheiten werden mit Verkleinerung der Grenzwellenlänge kleiner (siehe Abbildung 28).

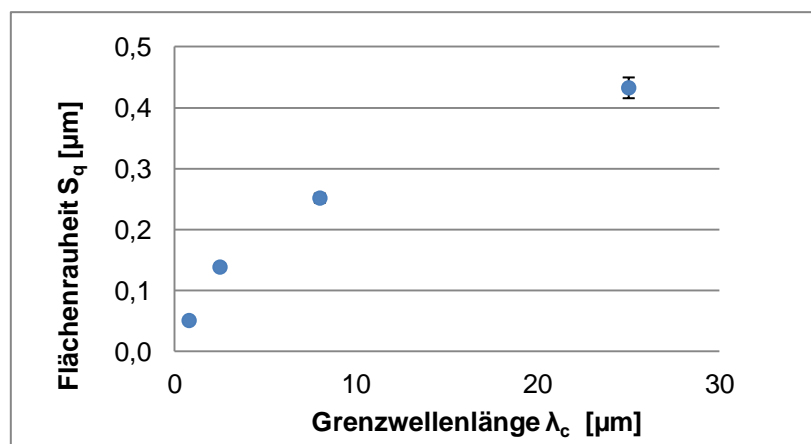


Abbildung 28: Ausgangsrauheit der aufgerauten Corningsscheiben bei verschiedenen Grenzwellenlängen $\lambda_c=25\text{ }\mu\text{m}$, $8\text{ }\mu\text{m}$, $2,5\text{ }\mu\text{m}$, und $0,8\text{ }\mu\text{m}$ (s. Anl. 4.1.2-2).

Auf diese Weise wurde für jede Probe die Ausgangsrauheit für verschiedene Grenzwellenlängen ermittelt. Die geglätteten Felder wurden gleichermaßen behandelt und auf den entsprechenden Ausgangswert (gleicher Grenzwellenlänge) normiert. Durch die Normierung kann die Dämpfung der entsprechenden Rauheiten verdeutlicht werden. In Abbildung 29 ist diese für eine Grenzwellenlänge $\lambda_c = 25\text{ }\mu\text{m}$ aufgetragen.

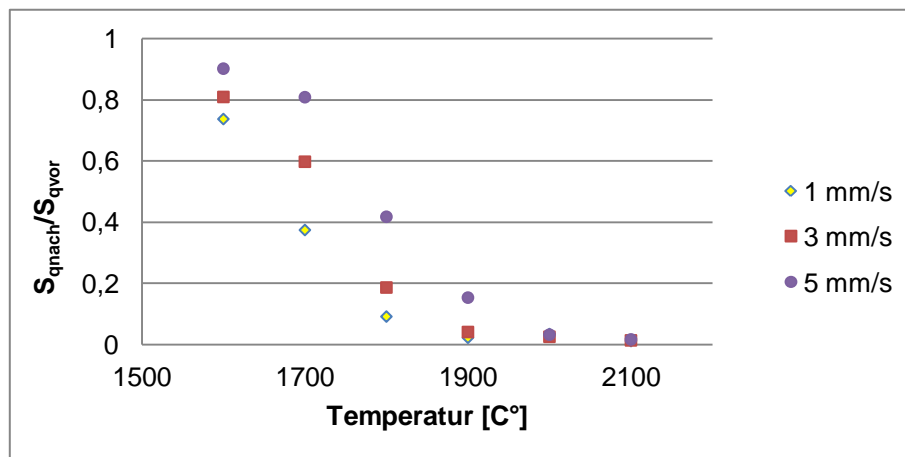


Abbildung 29: Normierte Rauheit erzeugter Testfelder unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c=25 \mu\text{m}$ (s. Anl. 4.1.2-3).

Der Vergleich von Abbildung 27 und Abbildung 29 zeigt, dass die Rauheit mit Oberflächenwellenlängen $\lambda < 25 \mu\text{m}$ bereits bei niedrigeren Temperaturen allgemein stärker gedämpft wird. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab und ab einer Temperatur von ca. $T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ hat die Vorschubgeschwindigkeit keinen Einfluss mehr auf die Dämpfung der Rauheit. Entsprechend der in Kapitel 2.4 erwähnten Tiefpasscharakteristik des Verfahrens ist eine stärkere Dämpfung der Rauheit bei niedrigeren Temperaturen durch die Verringerung der Grenzwellenlänge zu erwarten. In Abbildung 30 ist die Dämpfung der Rauheit unter Verwendung eines Filters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 0,8 \mu\text{m}$ dargestellt.

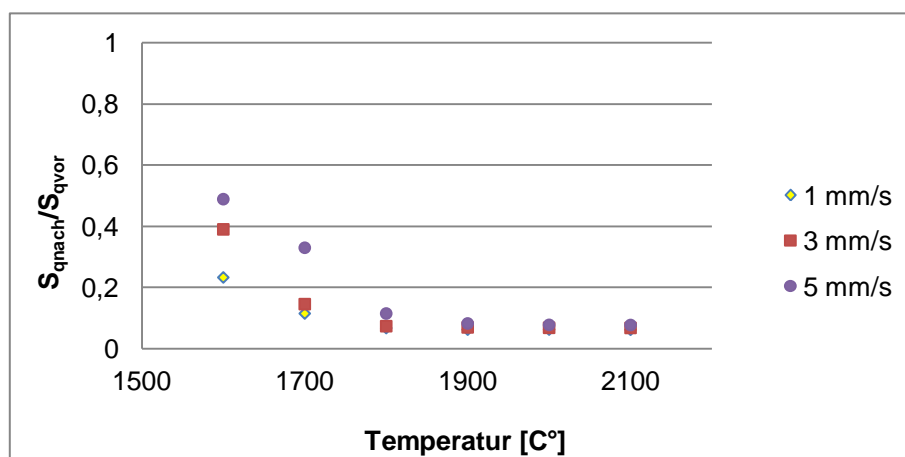


Abbildung 30: Normierte Rauheit erzeugter Testfelder unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c=0,8 \mu\text{m}$ (s. Anl.4.1.2-4).

Im Vergleich zu Abbildung 29 ist in Abbildung 30 eine deutlich stärkere Dämpfung bei geringeren Temperaturen erkennbar. Demnach kann diesem Verfahren ebenfalls eine Tiefpasswirkung zugesagt werden. Abbildung 30 zeigt weiterhin, dass die Vorschubgeschwindigkeit bereits ab einer Temperatur von $T \approx 1800\text{ °C}$ keinen wesentlichen Einfluss mehr hat. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Zeit, die das Material zur Umverteilung benötigt, für kleine Oberflächenwellen kleiner ist und die benötigte Temperatur zu deren Dämpfung geringer als für große Oberflächenwellen.

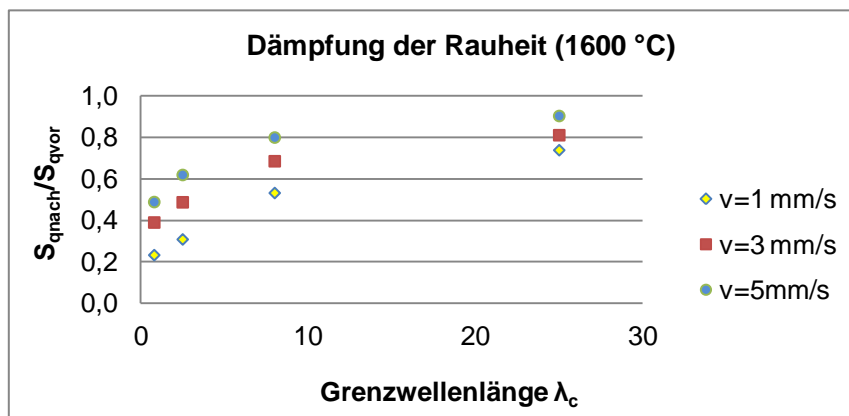


Abbildung 31: Dämpfung der Rauheit bei $T=1600\text{ °C}$ und verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten (s. Anl.4.1.2-5)..

In Abbildung 31 ist der typische Rauheitsverlauf für verschiedene Grenzwellenlängen dargestellt und entspricht qualitativ dem von Kratsch [Kra11] ermittelten Rauheitsverlauf für unterschiedliche Messstrecken. Von Abbildung 27 bis Abbildung 31 wurde auf die Angabe von Abweichungen aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet. Die errechneten Abweichungen sind dem Anhang zu entnehmen.

Ausgehend von den oben ermittelten Rauheitskurven kann eine Aussage darüber getroffen werden mit welchen Parametern eine Anwendung des Verfahrens auf Mikrostrukturen sinnvoll ist. Für folgende Versuche wird eine Solltemperatur von $T = 1600\text{ °C}$ und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 5\text{ mm/s}$ festgelegt. Bei diesen Parametern beträgt die Dämpfung der Rauheit für eine Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 25\text{ }\mu\text{m}$ rund 10 %, für eine Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8\text{ }\mu\text{m}$ bereits rund 50 %. Demnach ist bei diesen Parametern eine gute Dämpfung der Mikrorauheit zu erwarten, ohne dass die eigentliche Struktur stark umgeschmolzen wird.

4.1.3 Eigenschaften des Scanner-Verfahren

Für das Scanner-Verfahren wurde die Glättungswirkung ebenfalls an aufgerauten Corningscheiben untersucht. Bei diesem Verfahren wird Substrat nicht bewegt, wodurch die Maximaltemperatur in der Mitte des Temperaturfeldes genau erfasst werden kann. Dabei wird zusätzlich die Mittelwertbildung des Pyrometers über den Messfleck unterdrückt, da das Temperaturfeld in der Mitte des Bearbeitungsbereichs, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, relativ homogen ist. Für die erzeugten Testfelder wurden Maximaltemperaturen von $T = 1600 - 2100\text{ °C}$ eingesetzt. Die entstandenen Felder weisen, wie in Abbildung 32 erkennbar, eine runde Form auf und werden mit steigender Temperatur größer. Für alle Temperaturen betrug die Größe des Scann-Feldes auf dem Werkstück $10 \times 10\text{ mm}^2$.

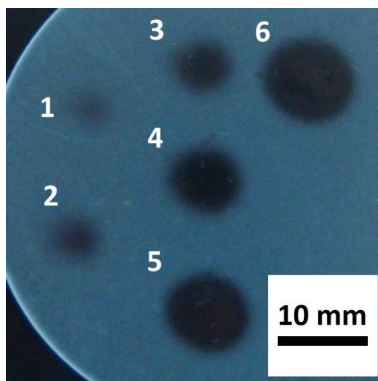


Abbildung 32: Mit dem Scanner-Verfahren erzeugte Testfelder.

Tabelle 7: Temperaturen und Durchmesser der mit dem Scanner-Verfahren erzeugten Testfelder (s. Anl.4.1.3-1)

| Feld | T in °C | Durchmesser [mm] | Sandartabw. |
|------------------------|---------|------------------|-------------|
| 1 | 1600 | - | - |
| 2 | 1700 | 1,87 | 0,164 |
| 3 | 1800 | 3,15 | 0,177 |
| 4 | 1900 | 4,69 | 0,184 |
| 5 | 2000 | 6,73 | 0,388 |
| 6 | 2100 | 7,85 | 0,475 |
| Einstellzeit $t_n=0,2$ | | Dämpfung KP=5 | |

Die Vergrößerung des Glättungsbereichs kann durch die Erhöhung der Temperatur und die Verlängerung der Interaktionszeit, in Verbindung mit der Wärmeleitung im Material, erklärt werden. Durch die Erfassung der Temperatur- und Zeitwerte für jedes Feld, zeigt sich bei diesem Verfahren eine Abhängigkeit der Interaktionszeit von der Maximaltemperatur.

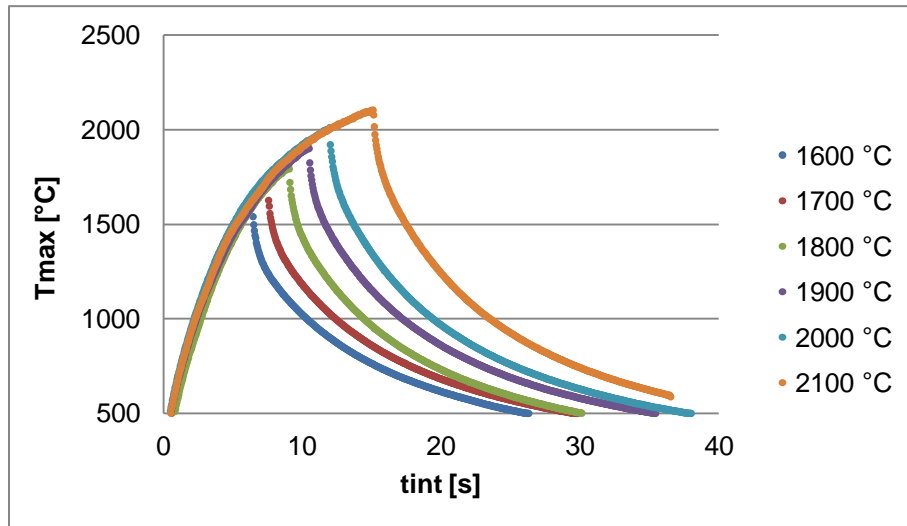


Abbildung 33: Temperaturkurven der mit dem Scanner-Verfahren geglätteten Felder, $KP = 5$, $t_n = 0,2$.

Alle Felder wurden mit den gleichen Regelungsparametern hergestellt, demzufolge ergibt sich für jedes Feld ein ähnlicher Temperaturverlauf (siehe Abbildung 33). Die Interaktionszeit im Sinne der Interaktion von Laserstrahl und Oberfläche sei hier nicht gemeint, da die Fläche nicht lokal im Laserstrahl aufgeschmolzen wird sondern über das entstehende Temperaturfeld. Von größerer Bedeutung ist somit in diesem Fall die Zeit, in der die Oberflächentemperatur über der Erweichungstemperatur $T_E = 1585\text{ °C}$ liegt. Diese Zeit bezieht sich auf die Einwirkdauer der Temperatur und soll im Folgenden Einwirkzeit t_{ewz} genannt werden. In dem Steuerungsprogramm wurde eine Funktion implementiert, die den Laser bei Erreichen der eingegebenen Solltemperatur abschaltet.

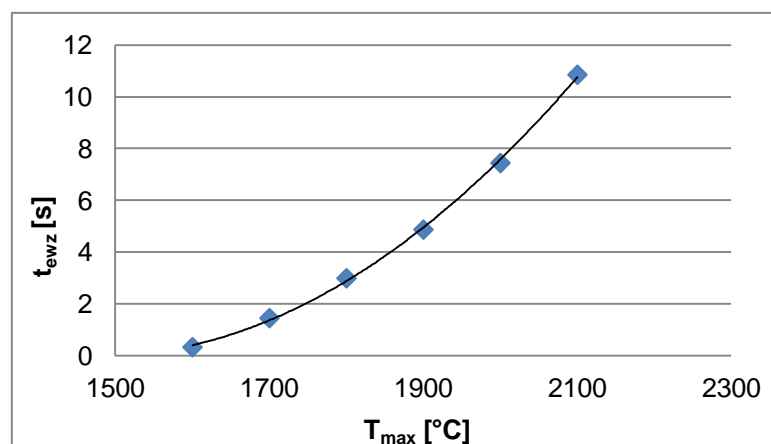


Abbildung 34: Einwirkzeit für $T = 1600 - 2100\text{ °C}$ (s. Anl. 4.1.3-2).

Da aber auch der Abkühlungsvorgang eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, verlängert sich die Zeit in der die Oberflächenspannung wirken kann. Die in Abbildung 34 aufgetragenen Einwirkzeiten beschreiben für jede Temperaturkurve das Zeitintervall Δt in dem $T > T_E$. Die Einwirkzeit bewegt sich in einem Bereich von 0,3 bis rund 11 Sekunden. Der gesamte Aufheiz- und Abkühlprozess dauert, aufgrund der großen Fläche bzw. der Größe des Volumens, sehr lange. Durch die Wärmeleitung im Material, die sich gerade bei hohen Temperaturen bemerkbar macht, wird die Aufheizdauer zusätzlich verlängert, da die Wärme über die Randbereiche des Scann-Feldes hinausgeleitet wird. Die Wärmeleitung wird wiederum durch lange Aufheizzeiten bzw. Einwirkzeiten begünstigt. Daraus resultiert eine starke Erwärmung des ganzen Substrates, was sich in dessen Verformung äußert (siehe Abbildung 35). Neben der Wärmeleitung treten zusätzlich Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung auf.

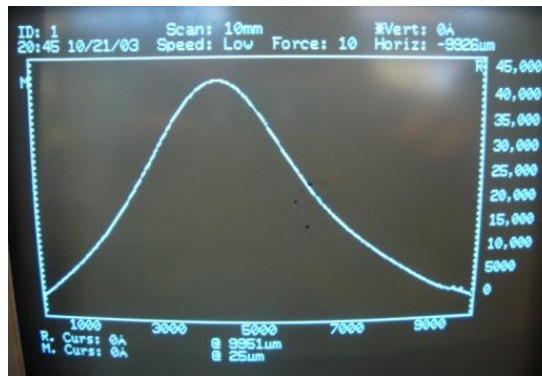


Abbildung 35: Substratverformung bei einer Maximaltemperatur von $T=2100\text{ °C}$.

Wie bereits von Kratsch [Kra11] festgestellt, sollte es unbedingt vermieden werden die Interaktionszeit und die damit verbundene Einwirkzeit unnötig hoch zu halten. Um die Aufheizzeit zu verkürzen, können die Regelungsparameter optimiert werden. Für die Glättung der Teststrukturen soll auch bei diesem Verfahren eine Heizplatte eingesetzt werden, um thermisch induzierte Spannungen zu vermeiden bzw. abzubauen.

4.1.4 Abschätzen der optimalen Glättungsparameter für das Scanner-Verfahren

Neben der Verformung des Substrates wurden die erzeugten Felder einer Rauheitsmessung unterzogen. Auch bei diesem Verfahren nimmt die Rauheit der Oberfläche mit steigender Temperatur ab.

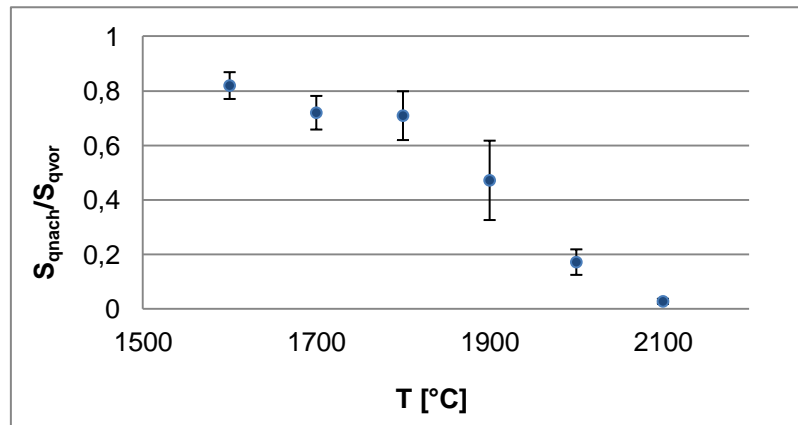


Abbildung 36: Dämpfung der Rauheit mit dem Scanner-Verfahren (s. Anl. 4.1.4-1).

Die Ausgangsrauheit konnte bei einer maximalen Temperatur von $T = 2100\text{ °C}$ von $S_q = 0,857 \pm 0,225\text{ }\mu\text{m}$ auf $S_q = 25 \pm 8\text{ nm}$ gesenkt werden. Um eine Aussage über die Stärke der Dämpfung verschiedener Oberflächenwellenlängen treffen zu können, wurde die Rauheit der Testfelder analog zum Zylinderlinsen-Verfahren unter Verwendung von Welligkeitsfiltern verschiedener Grenzwellenlängen ermittelt (siehe Abbildung 37).

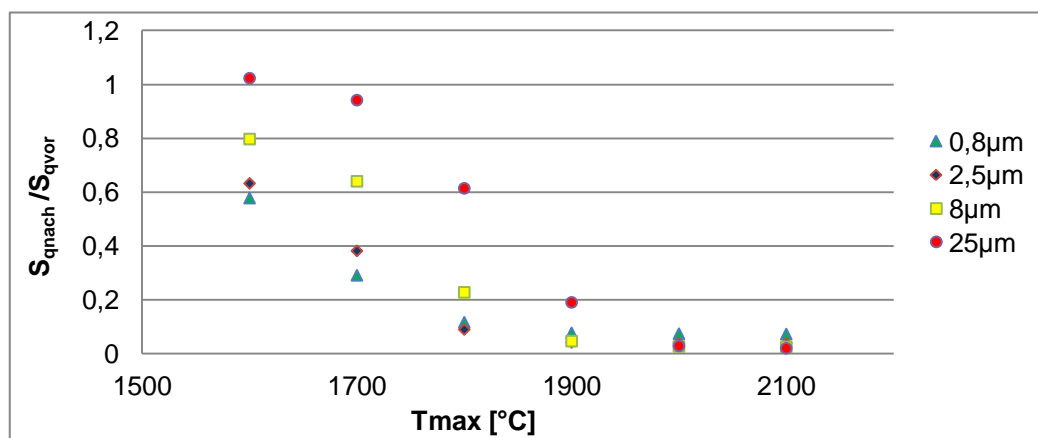


Abbildung 37: Normierte Rauheit der Testfelder bei Verwendung verschiedener Grenzwellenlängen λ_c (s. Anl. 4.1.4-2).

Für dieses Verfahren sind Interaktionszeit bzw. die Einwirkzeit und die Maximaltemperatur ebenso ausschlaggebend für den Verlauf der Rauheit wie beim Zylinderlinsen-Verfahren. Anhand der Abbildung 37 ist erkennbar, dass kleine Oberflächenwellenlängen bei bereits niedrigen Temperaturen stärker geglättet werden als große Oberflächenwellenlängen. Dies entspricht qualitativ dem Rauheitsverlauf der mit dem Zylinderlinsen-Verfahren hergestellten Testfelder. Die Gründe dafür wurden bereits in Kapitel 4.1.1 erörtert, jedoch kann für dieses Verfahren der Einfluss der Einwirkzeit nicht eindeutig ermittelt werden, da diese, wie oben beschrieben, von der Temperatur abhängig ist. Durch diese Abhängigkeit beschränkt sich jedoch die Wahl der Parameter allein auf die Temperatur. Für die Anwendungen auf die Teststrukturen wurde eine Temperatur von $T = 1700\text{ °C}$ als optimal befunden, da bei dieser Temperatur die Dämpfung der Rauheit für $\lambda_c = 25\text{ }\mu\text{m}$ bei rund 5 % und für $\lambda_c = 0,8\text{ }\mu\text{m}$ bei rund 70 % liegt. Unter Berücksichtigung einer minimalen Kantenverrundung ist bei dieser Temperatur eine gute Dämpfung der Rauheit zu erwarten.

4.2 Glätten der Teststrukturen

4.2.1 mit dem Zylinderlinsen-Verfahren

Mit den unter 4.1.2 für optimal befundenen Parametern wurden Testfelder vom Typ 1a geglättet. Aufgrund der relativ niedrigen Temperatur von $T = 1600\text{ °C}$ und der kurzen Interaktionszeit weist die Struktur jedoch nur eine sehr schwache Glättung auf.

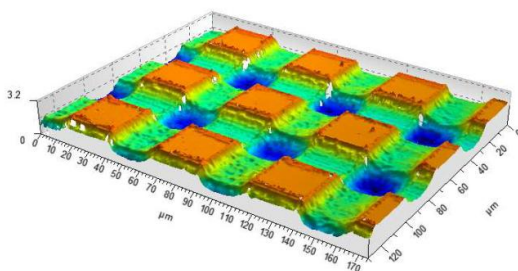


Abbildung 38: Kofokalmikroskopaufnahme der Struktur 1a vor dem Glätten.

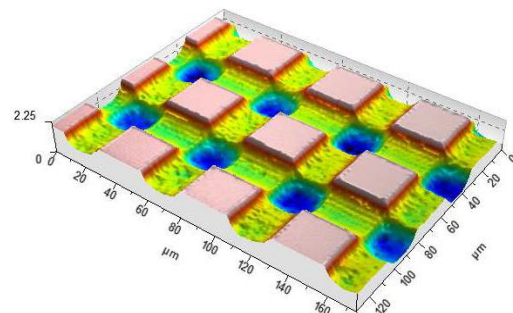


Abbildung 39: Kofokalmikroskopaufnahme der Struktur 1a nach dem Glätten.

Der Vergleich von Abbildung 38 mit Abbildung 39 zeigt, dass lediglich das Debris auf die Struktur aufgeschmolzen wurde. In den Gräben der Struktur ist keine signifikante Glättung eingetreten. Die Struktur 1c wurde ebenfalls mit diesen Parametern geglättet.

Die Struktur ist tiefer als die vom Typ 1a, demzufolge ist das Debris stärker ausgeprägt (siehe Abbildung 40, roter Kreis).

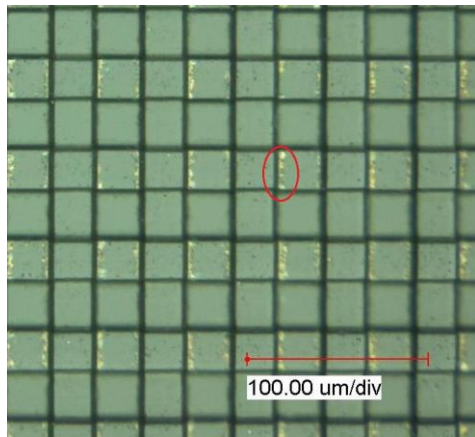


Abbildung 40: Struktur Typ 1c vor dem Glätten.

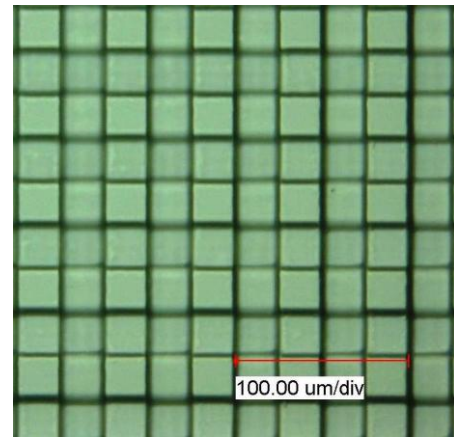


Abbildung 41: Struktur 1c nach dem Glätten, $T=1600\text{ °C}$, $v_f=5\text{ mm/s}$.

Bei der Betrachtung der Struktur 1c nach dem Glätten unter dem Auflichtmikroskop (siehe Abbildung 41) kein Debris mehr erkennbar, jedoch anhand Abbildung 42 ist bei Struktur 1c der gleiche Effekt zu beobachten wie an Struktur 1a.

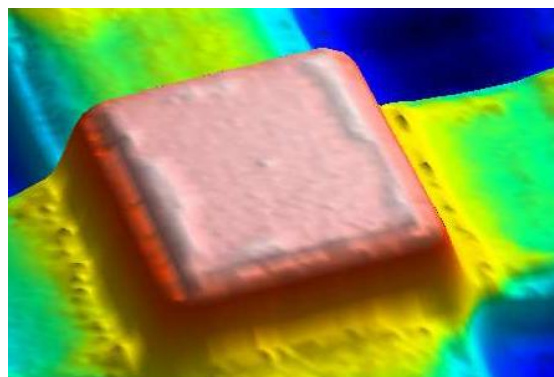


Abbildung 42: Auf der Struktur 1c aufgeschmolzenes Debris.

Es konnte weder das Debris beseitigt, noch die Oberfläche signifikant geglättet werden, demnach sind die Parameter für die Glättung dieser Strukturen ungeeignet. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Bewertung der Strukturen bezüglich der Entfernung des Debris durch Verwendung eines Auflichtmikroskops nicht möglich ist.

Um ein besseres Glättungsergebnis zu erhalten wurden weitere Strukturen von Typ 1b und 1c geglättet. Die Temperatur wurde dabei für Struktur 1b um $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $T = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ und für Struktur 1c um $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $T = 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit $v_f = 5\text{ mm/s}$ beibehalten. Die Erhöhung der Temperatur führte bei beiden Strukturen zur vollständigen Beseitigung des Debris und auch die Oberfläche in den Gräben konnte deutlich geglättet werden. Die gemessene quadratische Flächenrauheit der Struktur 1a betrug vor dem Glätten $S_q = 45\text{ nm}$. Durch den Einsatz der höheren Temperatur konnte diese auf einen Wert von $S_q = 17\text{ nm}$ gesenkt werden. Die Rauheitswerte wurden unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 5\text{ }\mu\text{m}$ ermittelt. Dadurch wird die Struktur als Welligkeit unterdrückt, wodurch eine flächenhafte Rauheitsmessung ermöglicht wird. Es ist davon auszugehen, dass die unbehandelten Flächen der Struktur das Ergebnis positiv beeinflussen. Anders als bei den Bohrlochraster-Strukturen kann die unbehandelte Oberfläche nicht einfach ausgeblendet werden. Da aber der größte Teil der Fläche strukturiert ist, bestimmt dieser maßgeblich die Rauheit, wodurch der Rauheitswert an Aussagekraft gewinnt. Die Qualität der Glättung kann alternativ durch einen Profilschnitt bewertet werden. In Abbildung 43 ist ein Profilschnitt der Struktur 1a dargestellt.

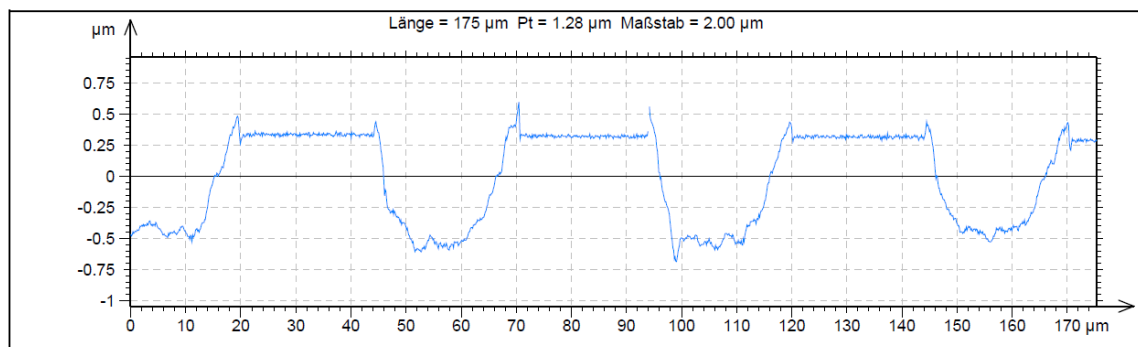


Abbildung 43: Profilschnitt der Struktur 1a vor dem Glätten.

An den Kanten ist das Debris erkennbar, es äußert sich im Profilschnitt an den Überhöhungen der Flanken. Zudem sind die Flächen der Gräben sehr uneben d.h. deren Rauheit ist groß.

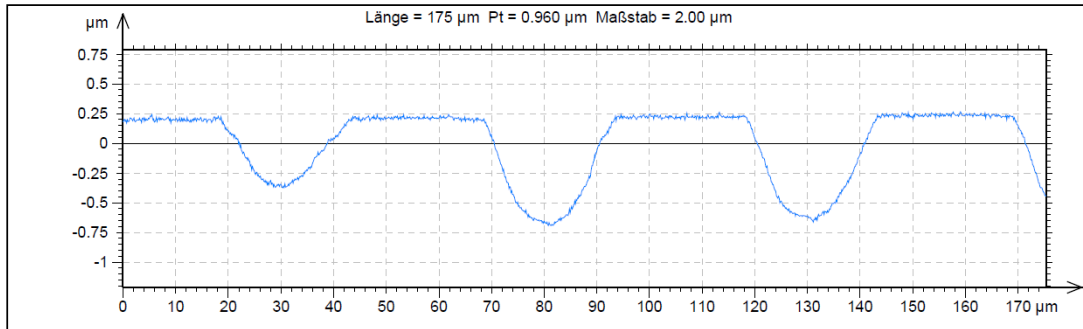


Abbildung 44: Profilschnitt der Struktur nach dem Glätten mit $T = 1700^\circ\text{C}$ und $v_f = 5 \text{ mm/s}$.

Der Profilschnitt der Struktur nach dem Glätten belegt die vollständige Beseitigung des Debris. Des Weiteren wurden die tieferliegenden Flächen deutlich geglättet und der Profilverlauf erscheint gleichmäßiger. Die Herstellungsspuren konnten mit diesen Parametern vollständig beseitigt werden und können demzufolge für die Nachbearbeitung von Strukturen in diesen Größenordnungen eingesetzt werden. In Bezug auf die Kantenverrundung kann der Einfluss der Glättung auf die Geometrie nur mäßig beurteilt werden. Da die tieferliegenden Flächen nicht eben bzw. die Flanken der Strukturen nicht senkrecht sind, lässt sich nur schlecht abschätzen inwieweit diese durch den Prozess verformt werden. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Gräben deutlich abgerundet wurden. Zusätzlich wird der Anstieg der Flanken flacher, wobei die Breite der Stege nur minimal abnimmt.

Die Struktur vom Typ 1c, die mit einer Temperatur von $T = 1750^\circ\text{C}$ geglättet wurde zeigt im Profilschnitt eine weitaus größere Kantenverrundung (siehe Abbildung 45) als die, die mit $T = 1700^\circ\text{C}$ geglättete (siehe Abbildung 44).

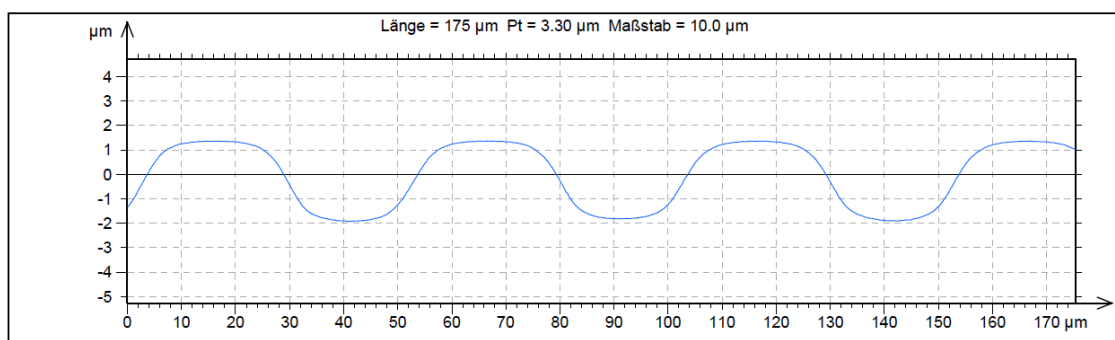


Abbildung 45: Profilschnitt quer zur Vorschubrichtung der Struktur 1b nach dem Glätten, $T = 1750^\circ\text{C}$, $v_f = 5 \text{ mm/s}$.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei dieser Temperatur nicht nur die Gräben, sondern auch die eigentlich ebenen, unstrukturierten Flächen abgerundet werden. Dadurch wird die Geometrie stark verändert, was sich in der Größe der „quasiebenen“ Bereiche und vor allem in der Tiefe der einzelnen Höhenstufen äußert. Durch die Vermessung der Struktur vor und nach dem Glätten konnten folgende Werte ermittelt werden:

Tabelle 8: gemessene Höhenstufen an Struktur 1c vor und nach dem Glätten.

| Struktur | ungeglättet | geglättet | mittlere Abweichung |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 1.Höhenstufe | -3,469 ($\pm 0,111$) μm | -3,069 ($\pm 0,267$) μm | 11,50% |
| 2.Höhenstufe | -6,793 ($\pm 0,144$) μm | -6,164 ($\pm 0,042$) μm | 9,30% |

Die Glättung der Strukturen mit einer Temperatur von $T = 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ führt demzufolge zu Reduzierung der Strukturtiefen um rund 10 % des Ausgangswertes. Dieser Wert gilt jedoch nur für Strukturen dieser Größenordnung und muss an weiteren, anders dimensionierten Strukturen überprüft werden. Es ist zu erwarten, dass der Wert mit größer werdenden Strukturen (laterale Ausdehnung) kleiner und mit kleiner werdenden Strukturen größer wird. Neben den Veränderungen der Strukturtiefe kommt es, wie bereits erwähnt, zur Verrundung ebener Flächen. Aus diskreten Höhenstufen (Abbildung 46 links) wird ein kontinuierlicher Verlauf (Abbildung 46 rechts).

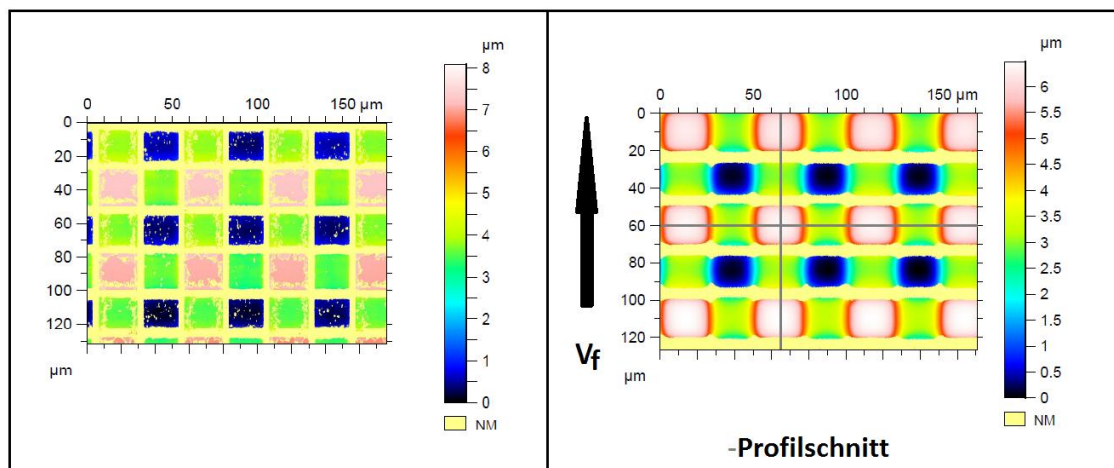


Abbildung 46: Struktur 1c in der Draufsicht vor und nach dem Glätten mit $T=1750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_f=5\text{ mm/s}$.

Die Bereiche der aufgenommenen Struktur in Abbildung 46, die nicht durch Falschfarben dargestellt sind repräsentieren Flächen der Struktur die sich in einem Winkel $\geq 45^{\circ}$ zur Aufnahmeebene befinden. Aus diesen Bereichen kommt während der Aufnahme keine Höheninformation zurück, es ist somit keine kontinuierliche Darstellung des Pro-

falls möglich. Für die linke Aufnahme in Abbildung 46 ist dies nachvollziehbar, die rechte Aufnahme hingegen lässt eine Richtungsabhängigkeit des Verfahrens vermuten. Da der Verlauf in der Richtung quer zum Vorschub kontinuierlich und in Richtung des Vorschubes nicht kontinuierlich ist, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die Struktur in diesen Richtungen unterschiedlich stark geglättet wurde. Der Grad der Glättung äußert sich wie oben beschrieben unter anderem durch die Abflachung der Strukturflanken. Um dies zu überprüfen wurde die geglättete Struktur erneut aufgenommen, jedoch um 90° verdreht. Die Aufnahme ergab das gleiche Bild wie die vorhergehende, was zur Schlussfolgerung führt, dass das Verfahren bzw. dessen Wirkung nicht von der Bearbeitungsrichtung abhängig ist.

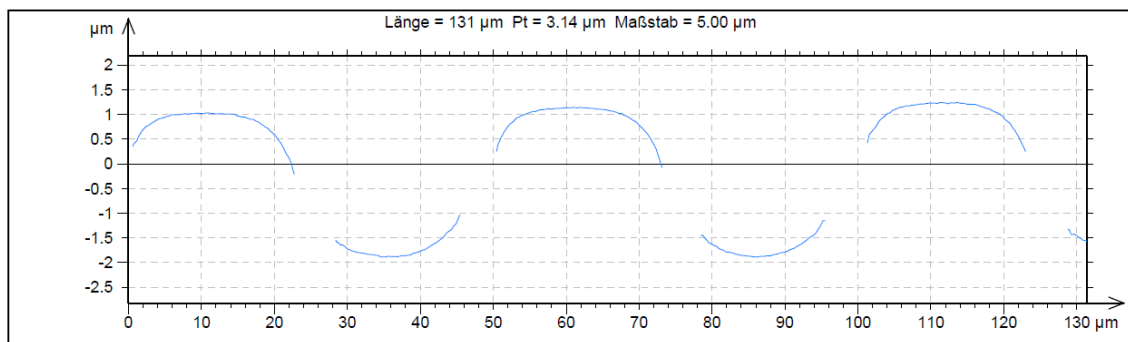


Abbildung 47: Profilschnitt in Vorschubrichtung der Struktur 1c nach dem Glätten, $T=1750^\circ\text{C}$, $v_f=5\text{ mm/s}$.

Der Grund für die fehlenden Messwerte liegt somit in einer Richtungsabhängigkeit der Messtechnik. Der erstellte Profilschnitt in Abbildung 47 ist in seinem Verlauf vergleichbar mit dem in Abbildung 45. Sowohl in der Tiefe, der Breite und dem Verlauf der Flanken sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

Aufgrund der stark ausgeprägten Kantenverrundung der Struktur 1c wurden für alle Testfelder vom Typ 2 die Parameter $T = 1700^\circ\text{C}$ und $v_f = 5\text{ mm/s}$ gewählt. Durch die Anwendung dieser Glättungsparameter konnte das Debris bei allen Strukturen vollständig beseitigt werden. Die Vermessung der Strukturtiefe von vier der hergestellten Strukturen, vor und nach dem Glätten zeigt, dass deren Änderung von der Ausgangstiefe selbst abhängt (siehe Abbildung 48).

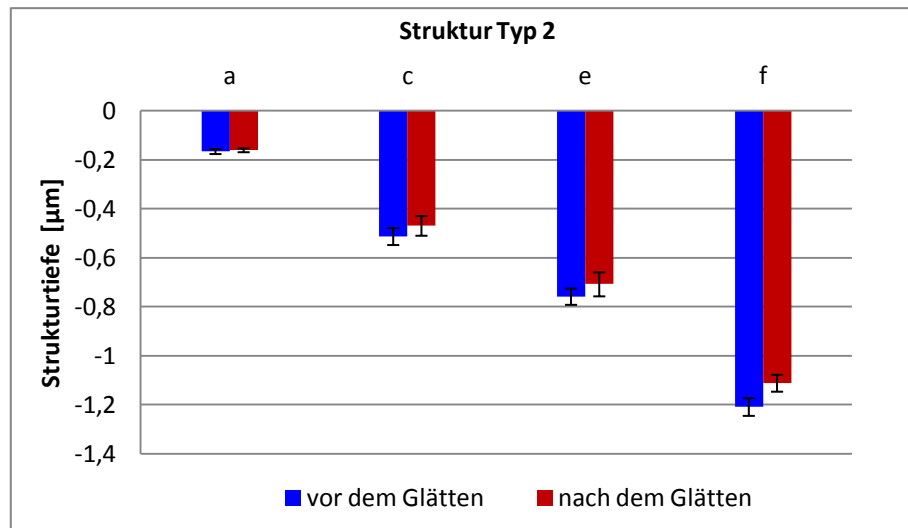


Abbildung 48: Strukturturen vor und nach dem Glätten, $T=1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_f=5\text{ mm/s}$ (s. Anl. 4.2.1-1).

Als Grund dafür wird vermutet, dass das Material an den Strukturflanken beim Aufschmelzen aufgrund der Schwerkraft in die Bohrung fließt. Je tiefer die Bohrung ist, desto mehr Material kann an den Flanken aufgeschmolzen werden. Demzufolge kann auch mehr Material in Richtung Bohrungsboden fließen. Dies führt zu einer Glättung der Strukturflanken, aber auch zu deren Abflachen und einer Verringerung der Bohrungstiefe.

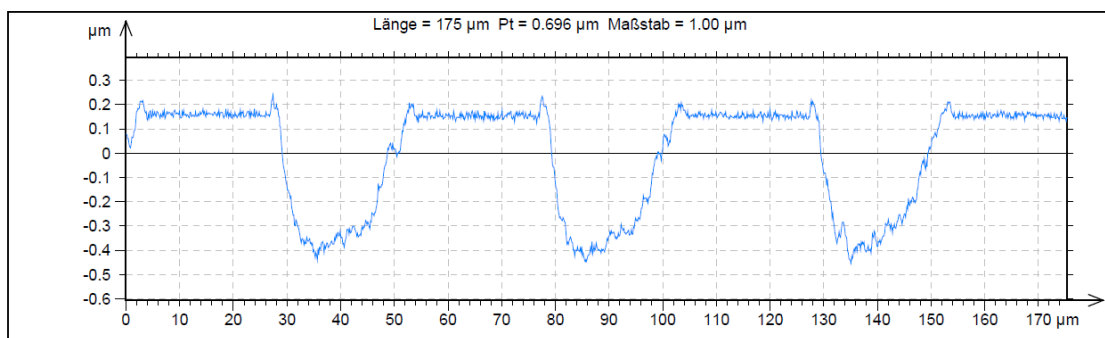


Abbildung 49: Profilschnitt des Bohrlochrasters vor dem Glätten.

Der Vergleich von Abbildung 49 mit Abbildung 50 zeigt eine deutliche Glättung der Strukturflanken. Des Weiteren kann anhand der Abbildungen gezeigt werden, dass das Debris vollständig beseitigt wurde und die Kantenverrundung nur sehr schwach ausgeprägt ist.

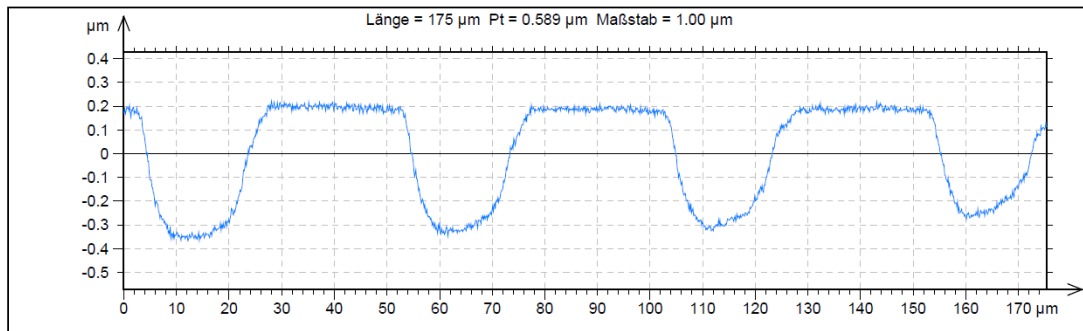


Abbildung 50: Profilschnitt des Bohrlochrasters nach dem Glätten.

Die Verrundung der Bodenflächen der Bohrungen ist einerseits durch die Herstellung bedingt und wird andererseits durch das Glätten begünstigt. Dadurch kann die Rauheit der Bodenflächen nur schwer gemessen werden.

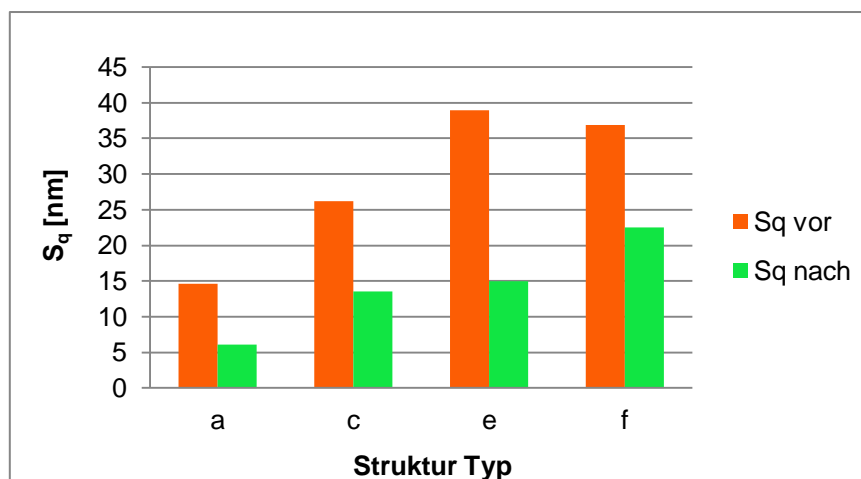


Abbildung 51: Flächenrauheit der Bohrungsböden vor und nach dem Glätten (s. Anl. 4.2.1-2).

Auch in diesem Fall wurde auf Welligkeitsfilter zurückgegriffen um die eigentliche Struktur als Welligkeit zu unterdrücken. Die Strukturen unterscheiden sich lediglich in der Tiefe der Bohrungen. Es zeigt sich, dass die Dämpfung der Rauheit mit zunehmender Strukturtiefe geringer wird (siehe Abbildung 51). Für die kleinste Bohrungstiefe von rund 166 nm konnte eine minimale Flächenrauheit von $S_q = 6 \text{ nm}$ erreicht werden. Dieser Wert liegt in der Größenordnung für die erreichbare Rauheit konventioneller Polierverfahren.

Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren wird bei einer Temperatur von $T = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ das Debris vollständig beseitigt und die Rauheit gut gedämpft bei gleichzeitigem Erhalt der Strukturgeometrie. Zur Erzeugung kontinuierlich Übergänge der Höhenstufen empfiehlt sich eine Temperatur von $T = 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beide Temperaturen gelten ausschließlich für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 5\text{ mm/s}$.

4.2.2 mit dem Scanner-Verfahren

Beim Glätten der Teststrukturen mit dem Scanner-Verfahren wurde von den in Kapitel 4.1.4 optimal befundenen Parameter ausgegangen. Die Strukturen 3a und 3b wurden demnach mit einer Temperatur von $T = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ geglättet.

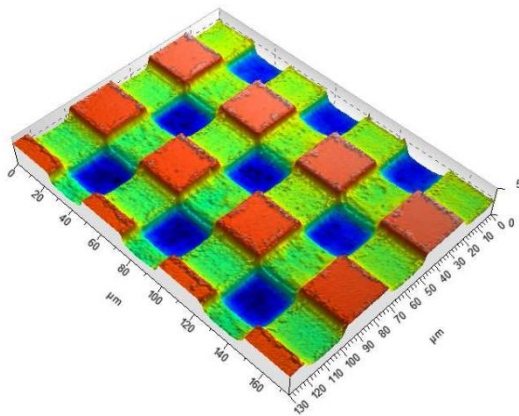


Abbildung 52: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a vor dem Glätten.

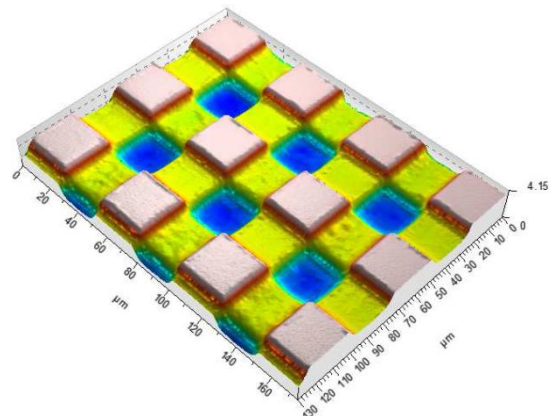


Abbildung 53: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a nach dem Glätten $T=1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $KP=5$, $t_n=0,2$.

Die Struktur 3a weist nach dem Glätten eine deutliche Verringerung der Rauheit der tiefer liegenden Bereiche auf. Zudem konnte das Debris an den Strukturkanten größtenteils beseitigt werden. Aus Abbildung 53 geht jedoch hervor, dass nicht alle Unebenheiten, einschließlich dem Debris, beseitigt werden konnten. Die Struktur 3b, welche mit selbigen Parameter geglättet wurde, zeigt ein deutlich besseres Ergebnis. Die deutliche Glättung tiefer liegender Bereiche und die vollständige Beseitigung des Debris zeigt der Profilschnitt in Abbildung 54.

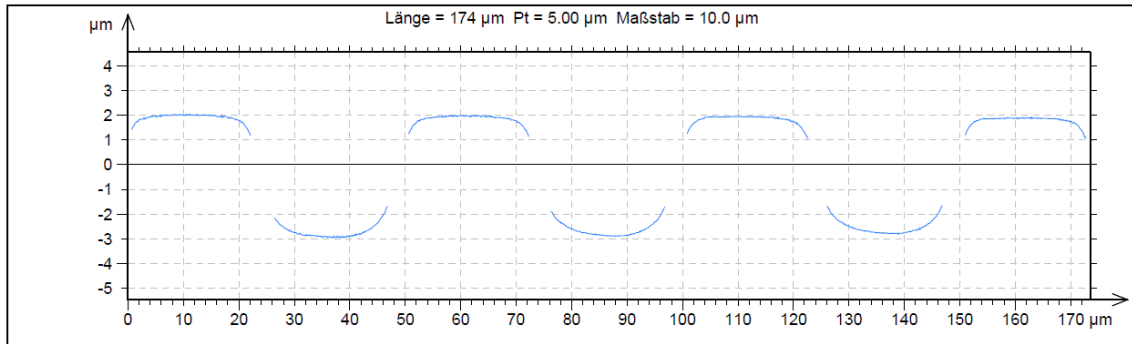


Abbildung 54: Profilschnitt der Struktur 3b nach dem Glätten.

Die aufgenommen Temperaturkurven (siehe Abbildung 55) zeigen den Grund für die Unterschiede, aber auch ein Problem, welches erst durch den Einsatz der Heizplatte auftritt. Die Strukturen wurden mit gleicher Temperatur hintereinander geglättet. Obwohl das Substrat mehrere Minuten vorgeheizt wurde, ist die Aufheizgeschwindigkeit für die Strukturen unterschiedlich, was auf unterschiedliche Ausgangstemperaturen schließen lässt. Dieser Unterschied kann durch zu kurzes Vorheizen entstehen.

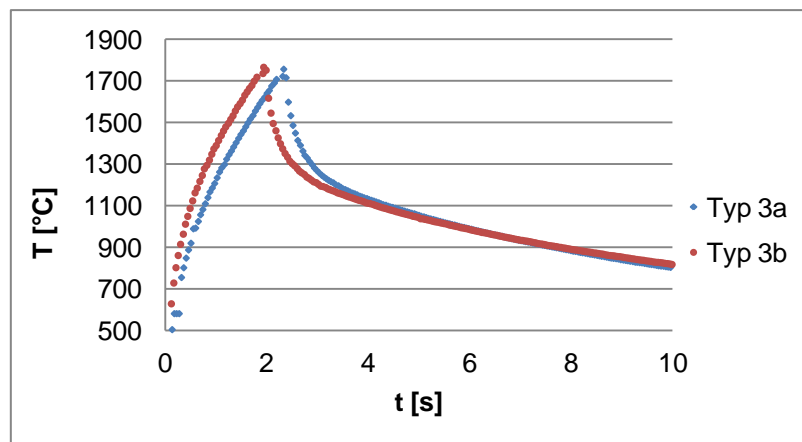


Abbildung 55: Temperaturkurven beim Glätten von Struktur 3a und 3b.

Je höher die Substrattemperatur ist, umso weniger Zeit benötigt die Steuerung zum Erreichen der Solltemperatur, da die Temperaturdifferenz mit steigender Substrattemperatur geringer wird. Dies wirkt sich jedoch nur minimal auf die Einwirkzeit aus und kann somit nicht als Grund für die Unterschiede angenommen werden. Der Arbeit von Richmann [Ric09] ist zu entnehmen, dass das Glättungsergebnis von der Substrattemperatur abhängt. Je höher die Ausgangstemperatur des Substrates ist, desto besser ist das Glättungsergebnis. Dieser Effekt kann den Unterschied der Glättung erklären. Des Weiteren kommt es beim Einsatz der Heizplatte mit den in 4.1.4 verwendeten Rege-

lungparametern zum überschreiten der Solltemperatur. Bei beiden Strukturen wurde die Solltemperatur um rund $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ überschritten. Durch eine Anpassung der Regelungsparameter konnte eine starke Überhöhung der Temperatur verhindert und der Prozess, bezogen auf die Solltemperatur, stabilisiert werden.

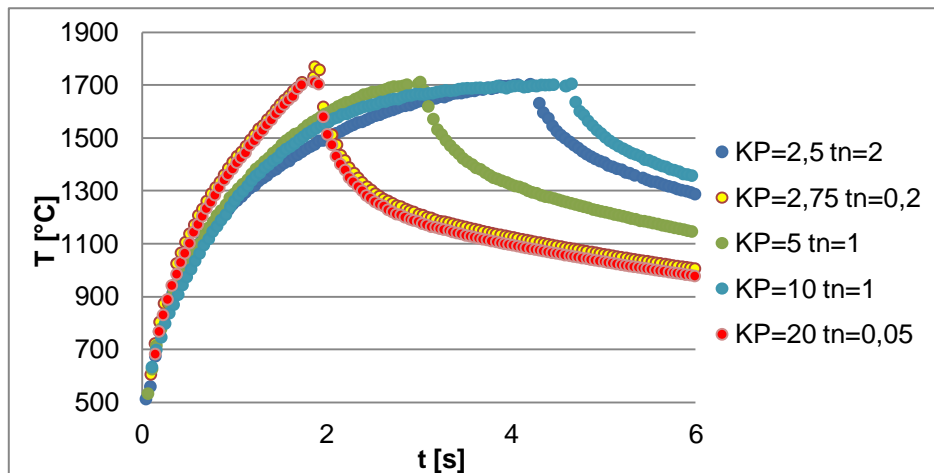


Abbildung 56: Temperaturkurven für verschiedene Regelungsparameter.

Abbildung 56 verdeutlicht den Einfluss der Parameter KP und t_n auf den Temperaturverlauf. Prinzipiell können alle ermittelten Parameterpaare eingesetzt werden, bis auf die Parameter die für das Zylinderlinsen-Verfahren ermittelt wurden ($KP = 5, t_n = 0,2$). Des Weiteren sind diese Parameter nur für eine Solltemperatur von $T = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Substrattemperatur von rund $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ gültig. Abweichende Solltemperaturen wirken sich auf den Temperaturverlauf und somit auf die Einwirkzeit aus. Für weitere Versuche wurden die Regelungsparameter $KP = 5$ und $t_n = 1$ verwendet.

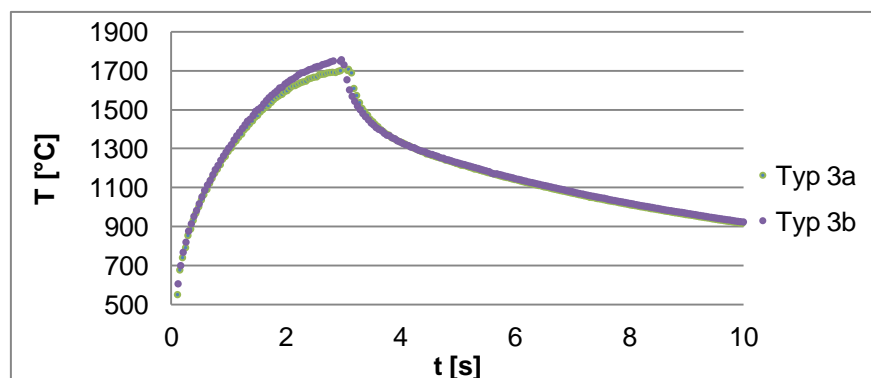


Abbildung 57: Temperaturkurven mit angepassten Parametern.

Diese Parameter führen zu einer längeren Aufwärmzeit (siehe Abbildung 57) und damit auch zu einer Verlängerung der Einwirkzeit, was aber einen gewissen Spielraum, bezogen auf die Solltemperatur, lässt. Bei Erhöhung der Solltemperatur in geringem Maße kommt es nicht sofort zum überschreiten dieser. Das Glätten weiterer Strukturen vom Typ 3a und 3b ergab durch die Verlängerung der Einwirkzeit bessere Glättungsergebnisse. Die in Abbildung 58 dargestellte Struktur vom Typ 3a erscheint sehr glatt in ihrer Oberfläche, dennoch sind die Höhenstufen klar voneinander abgrenzbar und die Übergänge nur leicht verrundet.

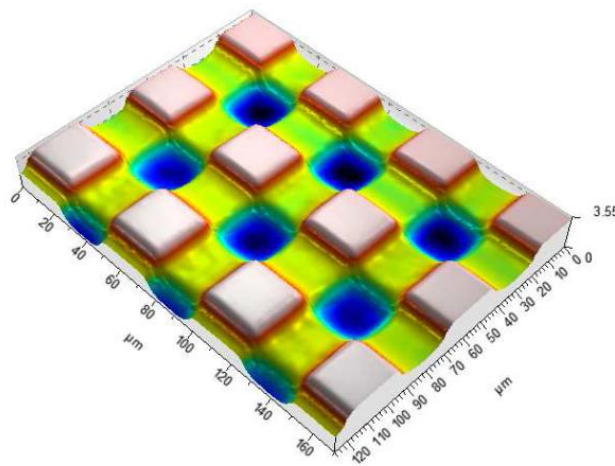


Abbildung 58: Konfokalmikroskopaufnahme der Struktur 3a nach dem Glätten, $T=1700^{\circ}\text{C}$, $KP=5$, $t_n=1$.

Durch die Verlängerung der Einwirkzeit werden die Unebenheiten trotz geringerer Temperatur besser geglättet. Für die Struktur vom Typ 3b wurde die Solltemperatur auf $T = 1750^{\circ}\text{C}$ erhöht. Anhand der Abbildung 59 ist erkennbar, dass es aufgrund der höheren Temperatur zum starken Verrunden der Kanten und der unbearbeiteten, ebenen Bereiche kommt.

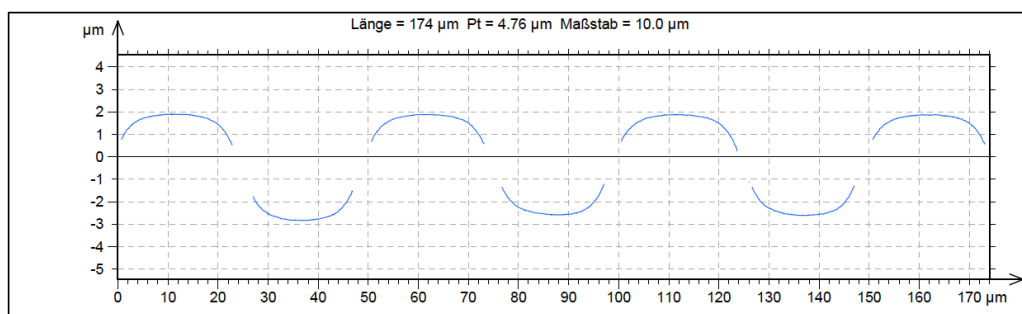


Abbildung 59: Profilschnitt der Struktur vom Typ 3b nach dem Glätten $T=1750^{\circ}\text{C}$.

Des Weiteren werden die Flanken der Struktur durch eine starke Materialumverteilung abgeflacht und die Tiefe der Strukturen ändert sich. Die Vermessung der Höhenstufen ergab folgende Werte:

Tabelle 9: gemessene Höhenstufen der Struktur 3b vor und nach dem Glätten.

| Struktur | ungeglättet | geglättet | mittlere Abweichung |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 1.Höhenstufe | -4,833 ($\pm 0,111$) μm | -4,442 ($\pm 0,153$) μm | 8,09% |
| 2.Höhenstufe | -9,343 ($\pm 0,161$) μm | -8,691 ($\pm 0,140$) μm | 6,97% |

Die Höhenstufen verringern sich bei den eingesetzten Parametern um rund 7 - 8 %. An allen anderen Strukturen von Typ 3 wurden geringere Abweichungen ermittelt. Eine Vermessung der Rauheit der Strukturen ergab eine minimale Flächenrauheit von $S_q = 28 \text{ nm}$ bzw. $S_q = 31 \text{ nm}$ für die Strukturen, die mit angepassten Parametern geglättet wurden.

Aufgrund der starken Änderung der Geometrie wurde, unter Verwendung der angepassten Regelungsparameter, für die folgenden Versuche an den Strukturen vom Typ 4 eine Solltemperatur von $T=1700 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt. Für alle Teststrukturen konnte die Temperatur auf wenige Grad eingehalten werden. Die Vermessung der Strukturturen ergab, dass bei diesem Verfahren der Einfluss auf Strukturturen sehr gering ist (siehe Abbildung 60). Für alle Testfelder beträgt die Abweichung der Bohrungstiefen $< 5 \%$.

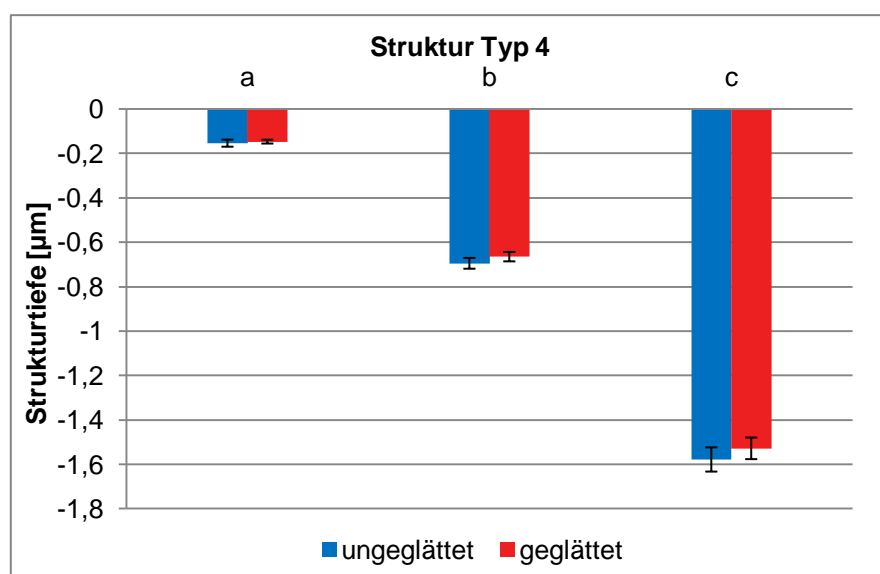


Abbildung 60: Höhenstufen der Strukturen Typ 4 vor und nach dem Glätten mit $T=1700 \text{ }^\circ\text{C}$.

In Abbildung 61 ist ein Profilschnitt der Struktur 4c vor dem Glätten dargestellt. An den Kanten der Struktur ist das Debris erkennbar. Die Bodenflächen der Bohrungen der Strukturen vom Typ 4 sind herstellungsbedingt ebener als bei den Strukturen vom Typ 2.

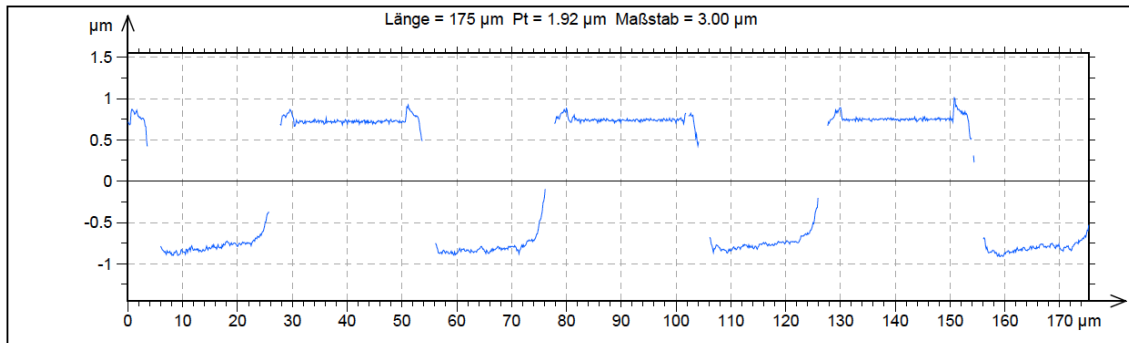


Abbildung 61: Profilschnitt der Struktur 4c vor dem Glätten.

Durch die Glättung der Struktur bei $T=1700\text{ °C}$ kann das Debris vollständig beseitigt werden (siehe Abbildung 62). Die Unebenheiten der Bohrungsböden werden ebenfalls sehr stark reduziert, bei minimaler Kantenverrundung.

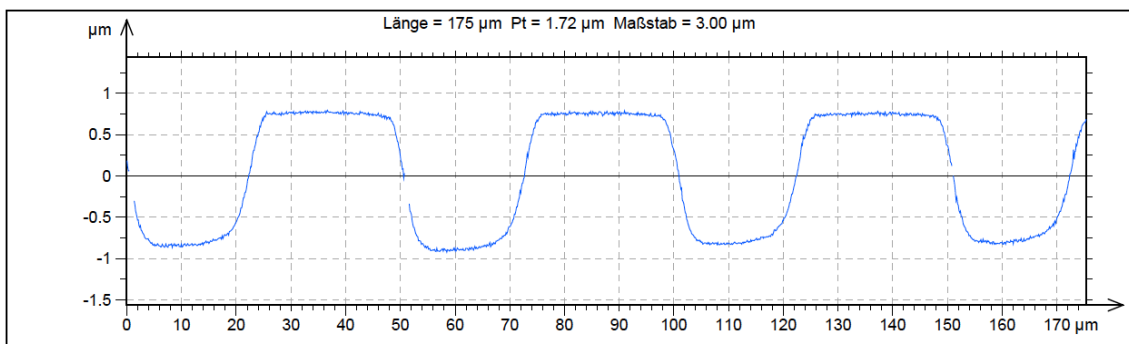


Abbildung 62: Profilschnitt der Struktur 4c nach dem Glätten, $T=1700\text{ °C}$.

Durch die Glättung wurde die Struktur nur geringfügig in ihrer Form, d.h. im Verlauf der Flanken verändert. Allgemein kann gesagt werden, dass die Struktur bei den verwendeten Parametern optimal geglättet wurde, da hauptsächlich die Rauheit und das Debris beseitigt wurde, aber die Struktur in ihrer Form erhalten wurde. Die Messung der Flächenrauheit der Bohrungsböden ergab eine Reduzierung der Rauheit von 30 bis 40 % des gemessenen Wertes vor dem Glätten.

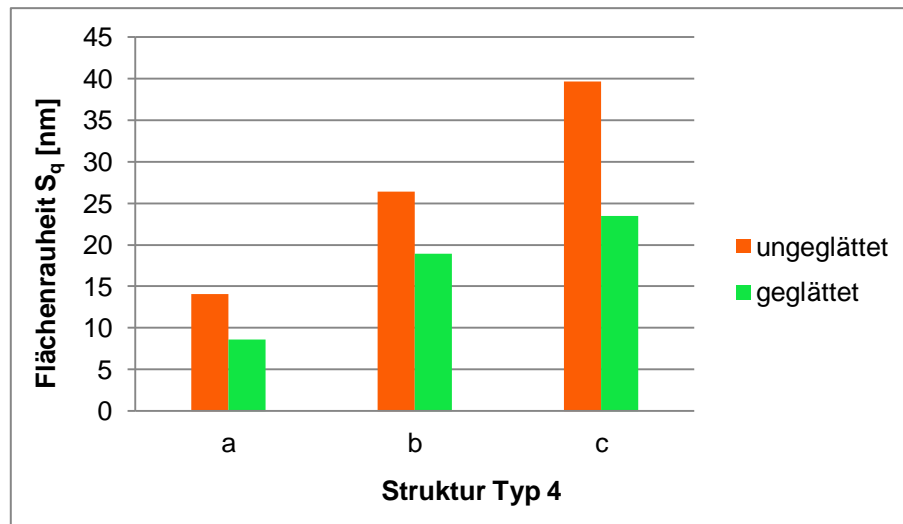


Abbildung 63: Ermittelte Flächenrauheit der Strukturen vom Typ 4 vor und nach dem Glätten.

In Abbildung 63 sind die gemessenen Rauheiten vor und nach dem Glätten dargestellt. Die Werte wurden unter Verwendung eines Gaußfilters mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 5 \mu m$ ermittelt. Für die Struktur 4a konnte ein minimaler Rauheitswert von $S_q = 8 nm$ erreicht werden, für die anderen Strukturen beträgt die Rauheit $S_q < 25 nm$.

Dieses Verfahren ist mit den angepassten Regelungsparametern und einer Temperatur von $T = 1700 \text{ } ^\circ C$ optimal zum Glätten von Mikrostrukturen dieser Größenordnung geeignet. Diese Parameter sind allerdings nur anwendbar bei einer Substrattemperatur von rund $500 \text{ } ^\circ C$, um eine zuverlässige Temperaturregelung zu garantieren. Um kontinuierlichere Übergänge der Höhenstufen herzustellen, kann optional eine Temperatur von $T = 1750 \text{ } ^\circ C$ eingesetzt werden.

4.3 Gegenüberstellung der Verfahren

In den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.3 wurden bereits die Werte für die Breite bzw. den Durchmesser der Glättungsbereiche ermittelt. Für beide Verfahren sind diese Größen abhängig von der Temperatur und steigen mit dieser an (siehe Abbildung 64).

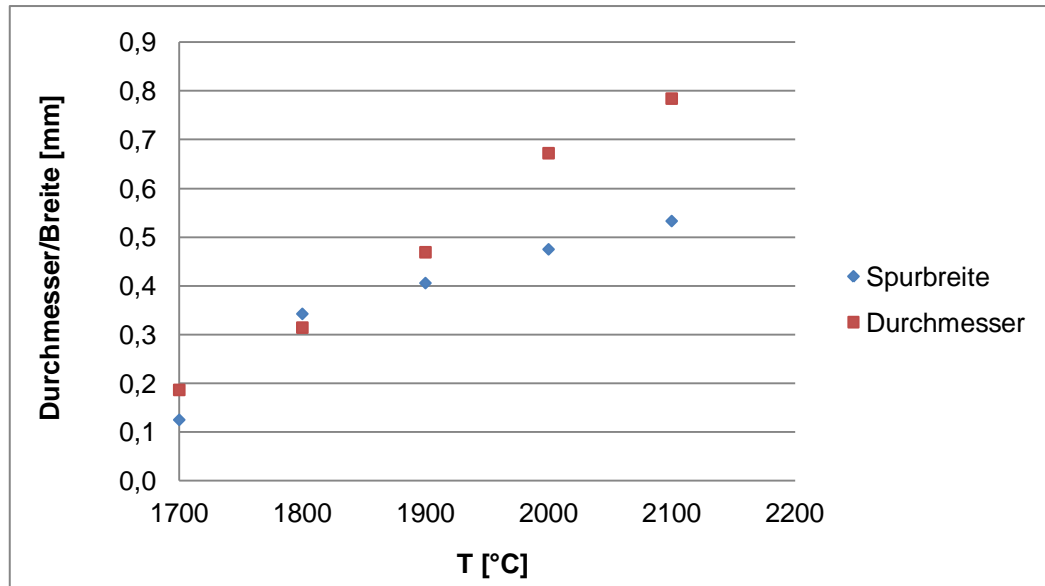


Abbildung 64: Abhängigkeit der Breite sowie des Durchmessers des Glättungsbereichs von der Temperatur.

Aus den ermittelten Werten lässt sich jedoch kein Vorteil eines Verfahrens ableiten. Aussagekräftiger sind die mit den Verfahren erzielbaren Flächenraten FR_z und FR_s , die aus den oben ermittelten Werten und mittels (3.3) und (3.4) errechnet werden können. Für das Scanner-Verfahren ergibt sich die Flächenrate F_s aus der Kreisfläche des Glättungsbereichs, die sich über den Durchmesser d berechnet

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (4.1)$$

Es zeigt sich, dass das Zylinderlinsen-Verfahren für die gewählte Vorschubgeschwindigkeit deutlich effektiver ist als das Scanner-Verfahren. Für eine Temperatur von $T = 2100 \text{ °C}$ ist eine maximale Flächenrate von $FR_z = 0,26 \text{ cm}^2/\text{s}$ erreichbar. Mit dem Scanner-Verfahren kann lediglich eine maximale Flächenrate von $FR_s = 0,032 \text{ cm}^2/\text{s}$ erreicht werden. Der Grund für diesen Unterschied liegt bei der Größe des aufzuheizenden Volumens, welches für das Zylinderlinsen-Verfahren deutlich kleiner ist und die Zeit bis zum Erreichen der Solltemperatur dementsprechend geringer.

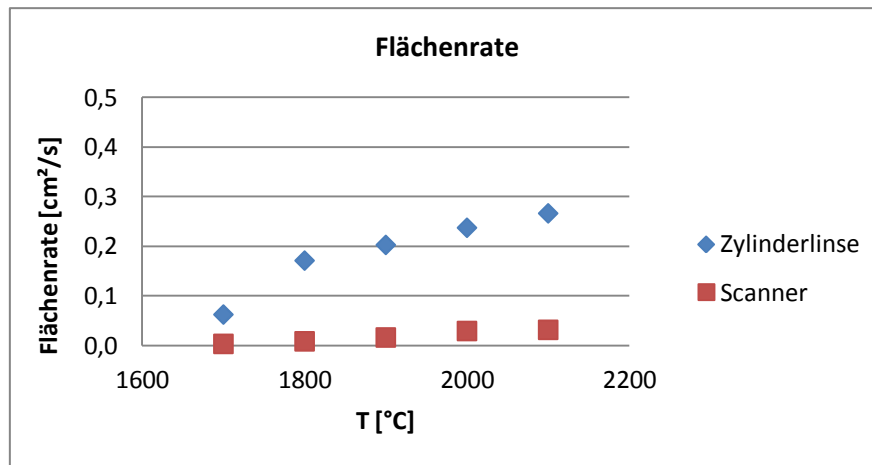


Abbildung 65: Ermittelte Flächenrate für die Verfahren in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die ermittelten Flächenraten zeigen, dass das Zylinderlinsen-Verfahren deutlich schneller ist als seine Konkurrenz. Die Werte gelten allerdings nur für die in 4.1.1 und 4.1.3 eingesetzten Regelungsparameter. Des Weiteren ist auch die Flächenrate des Zylinderlinsen-Verfahrens im Vergleich zu der, von Richmann [Ric11] angegebenen, Flächenrate von $FR = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ gering.

Bei der Anwendung der Verfahren auf die Teststrukturen können nur minimale Unterschiede festgestellt werden. Das Zylinderlinsen-Verfahren beeinflusst die Strukturtiefe geringfügig mehr als das Scanner-Verfahren. Der Grund dafür ist vermutlich die inhomogene Temperaturverteilung in Richtung des Vorschubs einerseits und die Mittelung der Temperatur über den Messfleck des Pyrometers andererseits. Die daraus resultierende maximale Temperatur liegt somit über dem Mess- bzw. Sollwert und begünstigt die Umverteilung des Materials. Dies kann auch durch die erreichten Rauheiten bestätigt werden, da im Allgemeinen die Werte mit steigender Temperatur kleiner werden. Das Scanner-Verfahren ist demnach bezogen auf die Temperaturmessung genauer, jedoch mussten die Regelungsparameter beim Einsatz der Heizplatte angepasst werden, damit es nicht zu einem Überschreiten der Solltemperatur kommt. Durch die Verringerung der Temperaturdifferenz reduziert sich die Aufheizzeit. Dadurch wird das Scanner-Verfahren deutlich schneller und damit effektiver. Für die Glättung der Strukturen konnte die Zeit zum Erreichen der Solltemperatur im Mittel auf $a_{abs} = 3,04 \text{ s}$ gesenkt werden. Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren konnten die Felder innerhalb von $t = 2,5 \text{ s}$ geglättet werden. Die benötigte Vor- und Nachlaufstrecke sowie die Verzögerung der Achse beim Beschleunigen verlängern die Bearbeitungszeit, sodass dieses Verfahren nur geringfügig schneller ist als das Scanner-Verfahren.

Die Substrate mit den Strukturen wurden auf ihre Verformung nach dem Glätten untersucht. Durch eine taktile Messung auf der Rückseite der Testfelder 1c und 3b kann gezeigt werden, dass die Verformung geringer ist als die in Kapitel 4.1.1 und 4.1.3 ermittelte. Die Verformung wurde über eine Strecke von 10 mm gemessen. Dabei befanden sich die Testfelder in der Mitte des Messbereichs.



Abbildung 66: Substratverformung im Bereich der Teststruktur 1c nach der Glättung mit dem Zylinderlinsen-Verfahren unter Einsatz einer Heizplatte.

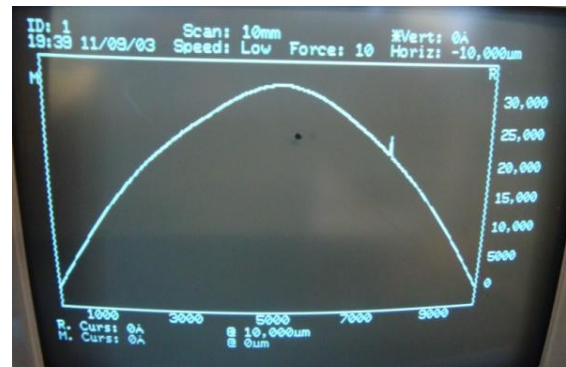


Abbildung 67: Substratverformung im Bereich der Teststruktur 3b nach der Glättung mit dem Scanner-Verfahren unter Einsatz einer Heizplatte.

Die Reduzierung der Verformung kann hauptsächlich mit der geringeren Glättungstemperatur von $T = 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ begründet werden. Welchen Einfluss die Heizplatte auf die Verformung der Substrate hat, kann anhand der Messungen nicht abgeschätzt werden.

Zur Überprüfung der Gleichwertigkeit beider Verfahren wurde je ein Test-DOE bei einer Temperatur von $T = 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ geglättet und unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommen. Die Temperatur wurde bewusst niedriger gewählt, um die zwischen den Pixeln befindlichen Stege (siehe Abbildung 68) nicht so stark umzuschmelzen wie bei dem in Abbildung 69 dargestellten Test-DOE. Die Stege wurden so stark umgeschmolzen, dass die Pixelflächen zu Mulden verformt werden.

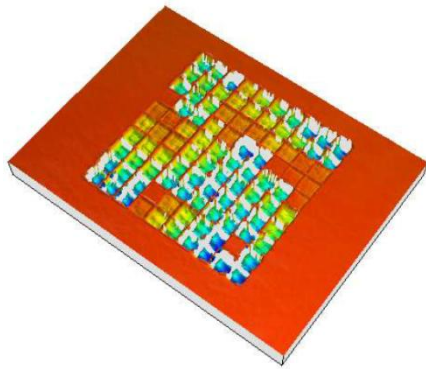


Abbildung 68: Konfokalmikroskop-aufnahme Test-DOE, 10 x 10 Pixel, Pixelgröße: 25 x 25 μm

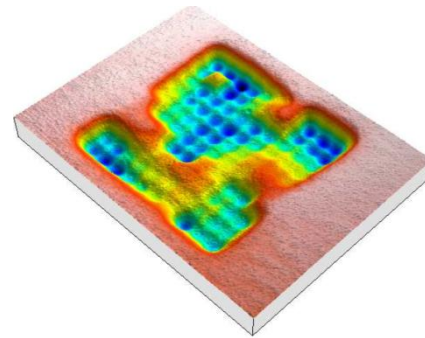


Abbildung 69: Mit dem Zylinderlinsen-Verfahren geglättetes Test-DOE, $T=1700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Anhand der REM-Aufnahmen (siehe Abbildung 70 und Abbildung 71) ist erkennbar, dass die Stege abgerundet wurden und die Flächen der Pixel glatt sind. Die Übergänge der Strukturelemente erscheinen kontinuierlich, was auf eine sehr glatte Oberfläche hin weist.

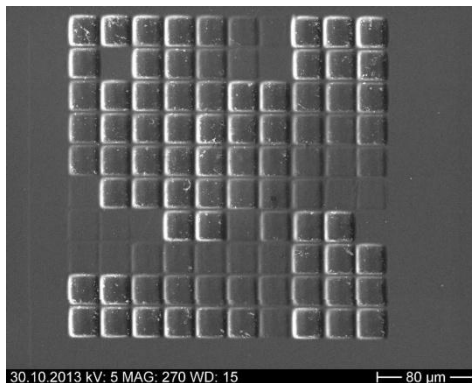


Abbildung 70: Test-DOE mit Zylinderlinsen-Verfahren geglättet, $T=1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_f=5\text{ mm/s}$.

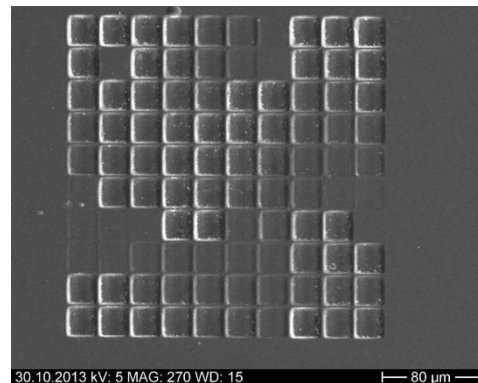


Abbildung 71: Test-DOE mit Scanner-Verfahren geglättet, $T=1650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die weißen Punkte in den tieferen Pixeln sind Staubpartikel die durch unzureichenden Schutz vor dem Beschichten in die Struktur gelangen konnten. Inwieweit die Stege komplett beseitigt werden können kann durch weitere Glättungsversuche an solchen Test-DOEs untersucht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Glätten Mikrostrukturen in Quarzglas ist prinzipiell mit beiden Verfahren möglich. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrer Wirkung nur geringfügig. Die minimal gemessene Rauheit liegt für das Zylinderlinsen-Verfahren bei $S_q = 6 \text{ nm}$ und für das Scanner-Verfahren bei $S_q = 8 \text{ nm}$. Im Allgemeinen sind die Werte abhängig von der Tiefe der Strukturen. Des Weiteren kann mit beiden Verfahren das Debris bei einer Temperatur von $T=1700 \text{ °C}$ vollständig beseitigt werden, ohne die Kanten der Strukturen stark zu verrunden. Dennoch ändern sich die Strukturen in ihrer Tiefe. Die ermittelte maximale Abweichung ist für das Scanner-Verfahren mit 7 – 8 % geringfügig kleiner als die für das Zylinderlinsen-Verfahren von rund 10 %. Auch in Bezug auf die Substratverformung unterscheiden sich die Verfahren nicht wesentlich voneinander. Die Verformung der Substrate konnte durch den Einsatz einer Heizplatte nicht vermieden werden. Es ist deshalb sinnvoll den Einfluss dieser auf die Qualität mikrooptischer Elemente wie DOEs zu ermitteln und weitere Untersuchungen zu deren Vermeidung durchzuführen. Das Zylinderlinsen-Verfahren ist mit einer Flächenrate von $FR_z = 0,26 \text{ cm}^2/\text{s}$ deutlich effektiver als das Scanner-Verfahren, jedoch nur ohne Einsatz einer Heizplatte. Wird das Substrat auf eine Temperatur von $T \approx 500 \text{ °C}$ vorgeheizt, verkürzt sich die Aufwärmzeit mit dem Scanner auf $t_{abs} = 3,05 \text{ s}$. Das Verfahren wird damit in Bezug auf die Glättung einzelner Strukturen konkurrenzfähig, da die Bearbeitung mit dem Zylinderlinsen-Verfahren mit $t = 2,5 \text{ s}$ nur wenig schneller ist. Aufgrund der nahezu gleichen Wirkung der Verfahren kann keine eindeutige Entscheidung getroffen werden, welches Verfahren das bessere ist. Das Zylinderlinsen-Verfahren ist das schnellere von beiden, das Scanner-Verfahren jedoch ist genauer in der Temperaturerfassung und dadurch geringfügig präziser. Das größere Potential für eine Prozessoptimierung und die Integration in eine industrielle Fertigungsanlage hat das Zylinderlinsen-Verfahren. Durch verschiedene Maßnahmen wie Homogenisierung der Laserstrahlung, die Verlängerung der Fokuslinie und eine zunehmende Fokussierung des Laserstrahls kann bei gleichbleibender Laserleistung ein weitaus größerer Bereich bearbeitet werden. Speziell DOEs könnten zu einer Vielzahl auf einem Substrat hergestellt werden und mit einer Überfahrt geglättet werden. Zusätzlich würde sich der Prozess bei Einsatz eines Fließbandes weiter verkürzen, da die Beschleunigungszeiten Bewegungssystems wegfallen und Vor- und Nachlauf minimiert werden könnte. Aus diesem Grund werden weitere Untersuchungen zu diesem Verfahren als sinnvoll erachtet.

Literaturverzeichnis

- [Arn09] Arnold T.; Böhm G.; Fechner R.; Meister J.; Nickel A.; Frost F.; Hänsel T.; Schindler A.: Ultra-precision surface finishing by ionbeam and plasmajettechniques In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Vol. 616 (2009), Nr. 616, S.147-156
- [Bec02] Beckstette Klaus F.: Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung am Beispiel von Lithografieoptiken, In: tm – Technisches Messen, 12 (2002), S.526-534
- [Bli10] Bliedner, Jens; Gräfe, Günter: „Optiktechnologie Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele“. 2. aktualisierte Auflage, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2010; ISBN: 978-3446422155
- [Büt13] Büttner, S.: CO₂-Laserglätten unter Verwendung einer Zylinderlinse, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Praktikumsbericht, 2013
- [Cor13] Corning Incorporated, HPFS® Fused Silica Standard Grade Semiconductor Optics, URL:<http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=17685>, verfügbar am 18.08.2013
- [Fäh98] Fähnle Oliver W.; Hedser van Brug; Frankena Hans J. , Fluid jet polishing of optical surfaces, APPLIED OPTICS, Vol. 37, (1998), No. 28, S.6771-6773
- [Fri77] Günther Heinz Frischat; Glas - Struktur und Eigenschaften, In: Chemie in unserer Zeit, Vol.11 (1977), Nr. 3, S. 65-74
- [Gie08] Giesekus Joachim, Poliermittelträger für des polieren optischer Gläser In: Laser + Photonics, 5/2008, S.12-13
- [Hän07] Hänsel T.; Frost F., Nickel A., Schindler A.: Ultra-precision Surface Finishing by Ion Beam Techniques, In: Vakuum in Forschung und Praxis, Vol. 19 (2007), Nr. 5, S.24-30
- [Hec12] Hecht Kerstin: Entwicklung eines Laserstrahlpoliervorgangs für Quarzglasoberflächen, Ilmenau, TU Ilmenau, Fakultätsübergreifendes Institut für Werkstoffwissenschaften, Dissertation 2012

- [Her09] Herwig Heinz, Moschallski Andreas Wärmeübertragung-Physikalische Grundlagen, Illustrierende Beispiele Übungsaufgaben mit Musterlösungen, 2.Auflage,Wiesbaden ,Vieweg+Teubner Verlag, 2009, ISBN: 978-3-8348-0755-7
- [Hof11] Hoffmeister, H.-W.; Wittmer, R.; Hahmann, W.-C.; Wagner, M; Dilger, K.; Heitkamp B.; Hoch A.; Drab, M.: Innovative Herstellung mikrooptischer Baugruppen, In: wt Werkstattstechnik online, Vol. 101 (2011), S. 91-97
- [Hüg92] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser – Eine Einführung, B.G. Teubner, Stuttgart, 1992, ISBN:3-519-06134-1
- [Jeb11] Jebesen -Marwedel, Hans; Brückner, Rolf : Glastechnische Fabrikationsfehler, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2011 , ISBN: 3642164331, 9783642164330
- [Kal12] Kalweit, A.: Handbuch für Technisches Produktdesign, Material und Fertigung, Endescheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012,ISBN: 978-3-642-02642-3
- [Kra11] Kratsch, A.: Glätten von Mikrostrukturen in Quarzglas mittels CO₂-Laser, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Bachelorarbeit, 2011
- [Kra111] Kratsch, A.: Glätten von Mikrostrukturen in wide bandgap Materialeien mittels CO₂-Laser, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Praxisbericht, 2011
- [Kra13] Kratsch, A.: Private Mitteilung. Hochschule Mittweida, 2013
- [Kre09] Kreller, M.; Kelling, J.; Lemke F.; Majewsky, S.: Physikalisches Grundpraktikum, Dresden, TU Dresden, Mathematik und Naturwissenschaften, Praktikumsanleitung, 2009
- [Lin06] Lindner, Helmut: Physik für Ingenieure, 17. Auflage, München, Hanser-Verlag, 2006, ISBN: 978-3-446-40609-4
- [Nes11] Nestler, Matthias; Demmler, Marcel; Zeuner, Michael; Kiontke, Sven: Ionenstrahlpolieren von feinoptischen Substraten, In: Vakuum in Forschung und Praxis, Vol. 23 (2011), Nr. 5, S.9–13

- [Neu05] Neubauer, J.: Technische Optik in der Praxis, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, ISBN: 978-3-540-21884-5
- [Oet97] Oettinger Eva, Clustersputtern an optischen Oberflächen, Konstanz, Universität Konstanz, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion, Dissertation, 1997
- [Opt13] OptoTech URL: <http://www.optotech.de/innovationen/a-fjp>, verfügbar am 18.04.13
- [Pol03] Pollicove, Harvey; Golini, Don: Deterministic Manufacturing Processes for Precision Optical Surfaces, In: Key Engineering Materials, vol. 238-239 (2003), S.53-58
- [Ric09] Richmann, A.; Wissenbach, K.; Willenborg, E.: Laserpolishing of fused silica, Aachen, RWTH, Lehrstuhl für Technologie optischer Systeme, Bericht
- [Ric11] Richmann A.; Willenborg E.; Wissenbach K.; Laser polishing of spherical quartz lenses; Aachen, RWTH, Lehrstuhl für Technologie optischer Systeme, Bericht
- [Sch86] Schmitt, Frieder; Ruck, Bodo; Lichtschnittverfahren zur qualitativen Strömungsanalyse, In: Laser und Optoelektronik, Vol. 2,(1986), S.107-118
- [Sen09] Sensortherm MY 51 Beschreibung und Bedienungsanleitung 06/2009
- [Las13] Laserphysik, Hochschule Mittweide, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Vorlesungsmitschrift
- [Vol05] Volk, Raimund; Rauheitsmessung - Theorie und Praxis; Berlin, Beuth Verlag, 2005
- [Wil05] Wilhelmus Messelink ; Waeger, Reto; Wons, Torsten ; Meeder, Mark ; Heiniger, Kurt C.: Prepolishing and finishing of optical surfaces using fluid jet polishing, In: Optical Manufacturing and Testing VI, 586908 (2005)

Anhang

Anlage 4.1.1-1

| T [°C] | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Feld | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Messung 1 | 1,28 | 3,69 | 4,23 | 4,79 | 5,23 |
| Messung 2 | 1,32 | 3,48 | 4,02 | 4,74 | 5,23 |
| Messung 3 | 1,34 | 3,41 | 4,02 | 4,84 | 5,30 |
| Messung 4 | 1,24 | 3,30 | 4,01 | 4,68 | 5,41 |
| Messung 5 | 1,10 | 3,27 | 4,03 | 4,72 | 5,50 |
| Mittelwert: | 0,13 | 0,34 | 0,41 | 0,48 | 0,53 |
| Standartabw.: | 0,010 | 0,017 | 0,009 | 0,006 | 0,012 |
| Vorschubgeschw. [mm/s]: | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Flächenraten: | 0,063 | 0,172 | 0,203 | 0,238 | 0,267 |
| Fehler: | 0,0048 | 0,0084 | 0,0047 | 0,0031 | 0,0059 |

Anl. 4.1.2-1

| Flächenrauheit Sq [µm] | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| Grenzwellenl. | 0,8 µm | 2,5 µm | 8 µm | 25 µm |
| Messung 1 | 0,05446 | 0,14540 | 0,25980 | 0,45100 |
| Messung 2 | 0,04898 | 0,13500 | 0,24620 | 0,41760 |
| Messung 3 | 0,04816 | 0,13420 | 0,24820 | 0,42840 |
| Mittelwert: | 0,0505 | 0,1382 | 0,2514 | 0,4323 |
| Standartabw.: | 0,0034 | 0,0062 | 0,0073 | 0,0170 |

Anl. 4.1.2-2

| Probe 12 Feld | Messung: v [mm/s] | 1 Sq [μm] | 2 Sq [μm] | 3 Sq [μm] | 4 Sq [μm] | 5 Sq [μm] | Mittelw. | Standart- abw. | T [°C] |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|-----------|
| 1 | 1 | 0,836 | 0,891 | 0,772 | 1,050 | 0,873 | 0,884 | 0,103 | 1600 |
| 2 | | 0,754 | 0,870 | 0,497 | 0,581 | 0,847 | 0,710 | 0,165 | 1700 |
| 3 | | 0,517 | 0,400 | 0,468 | 0,833 | 0,376 | 0,519 | 0,184 | 1800 |
| 4 | | 0,242 | 0,437 | 0,191 | 0,361 | 0,187 | 0,284 | 0,111 | 1900 |
| 5 | | 0,087 | 0,089 | 0,086 | 0,130 | 0,056 | 0,090 | 0,026 | 2000 |
| 6 | | 0,023 | 0,018 | 0,059 | 0,027 | 0,047 | 0,035 | 0,017 | 2100 |
| 7 | 3 | 0,811 | 0,685 | 1,040 | 0,733 | 1,210 | 0,896 | 0,222 | 1600 |
| 8 | | 1,240 | 0,702 | 0,746 | 0,687 | 0,922 | 0,859 | 0,232 | 1700 |
| 9 | | 0,551 | 0,639 | 0,564 | 0,485 | 0,612 | 0,570 | 0,059 | 1800 |
| 10 | | 0,495 | 0,278 | 0,455 | 0,261 | 0,275 | 0,353 | 0,113 | 1900 |
| 11 | | 0,334 | - | - | 0,104 | 0,247 | 0,228 | 0,116 | 2000 |
| 12 | | 0,051 | 0,083 | 0,120 | 0,064 | 0,113 | 0,086 | 0,030 | 2100 |
| Probe 13 | Ausgangsr.: | 0,854 | 0,941 | 0,939 | 1,080 | 1,070 | 0,977 | 0,096 | |
| 9 | 5 | 0,673 | 1,140 | 0,808 | 0,726 | 0,831 | 0,836 | 0,182 | 1600 |
| 10 | | 0,698 | 1,130 | 0,744 | 0,838 | 0,850 | 0,852 | 0,168 | 1700 |
| 11 | | 0,667 | 0,643 | 0,568 | 0,558 | 0,705 | 0,628 | 0,064 | 1800 |
| 12 | | 0,409 | 0,536 | 0,461 | 0,452 | 0,533 | 0,478 | 0,055 | 1900 |
| 13 | | 0,337 | 0,294 | 0,170 | 0,189 | 0,255 | 0,254 | 0,084 | 2000 |
| 14 | | 0,125 | 0,209 | 0,120 | 0,151 | 0,123 | 0,146 | 0,038 | 2100 |
| | Ausgangsr.: | 0,807 | 0,807 | 0,835 | 0,895 | 1,000 | 0,869 | 0,082 | |

Anl. 4.1.2-3

| Probe 12 Feld | Messung: | 1 Sq [μm] | 2 Sq [μm] | 3 Sq [μm] | 4 Sq [μm] | 5 Sq [μm] | | Standart- | T |
|---------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-----------|------|
| | v [mm/s] | | | | | | Mittelw. | Abw. | [°C] |
| 1 | 1 | 0,339 | 0,356 | 0,295 | 0,345 | 0,330 | 0,333 | 0,023 | 1600 |
| 2 | | 0,197 | 0,187 | 0,145 | 0,147 | 0,170 | 0,169 | 0,023 | 1700 |
| 3 | | 0,045 | 0,039 | 0,025 | 0,055 | 0,042 | 0,042 | 0,011 | 1800 |
| 4 | | 0,011 | 0,012 | 0,010 | 0,010 | 0,008 | 0,010 | 0,001 | 1900 |
| 5 | | 0,006 | 0,006 | 0,056 | 0,006 | 0,006 | 0,016 | 0,022 | 2000 |
| 6 | | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | | 0,005 | 0,000 | 2100 |
| 7 | 3 | 0,347 | 0,349 | 0,395 | 0,337 | 0,400 | 0,366 | 0,030 | 1600 |
| 8 | | 0,337 | 0,225 | 0,257 | 0,234 | 0,297 | 0,270 | 0,047 | 1700 |
| 9 | | 0,095 | 0,082 | 0,078 | 0,082 | 0,085 | 0,084 | 0,006 | 1800 |
| 10 | | 0,029 | 0,013 | 0,022 | 0,012 | 0,017 | 0,019 | 0,007 | 1900 |
| 11 | | 0,012 | 0,015 | 0,015 | 0,007 | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 2000 |
| 12 | | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,006 | 0,001 | 2100 |
| Probe 13 | Ausgangsr.: | 0,425 | 0,408 | 0,466 | 0,485 | 0,471 | 0,451 | 0,033 | |
| 9 | 5 | 0,354 | 0,422 | 0,385 | 0,348 | 0,377 | 0,377 | 0,029 | 1600 |
| 10 | | 0,307 | 0,381 | 0,333 | 0,343 | 0,327 | 0,338 | 0,027 | 1700 |
| 11 | | 0,165 | 0,158 | 0,190 | 0,154 | 0,207 | 0,175 | 0,023 | 1800 |
| 12 | | 0,061 | 0,072 | 0,052 | 0,059 | 0,077 | 0,064 | 0,010 | 1900 |
| 13 | | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,014 | 0,012 | 0,014 | 0,001 | 2000 |
| 14 | | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,000 | 2100 |
| | Ausgangsr.: | 0,318 | 0,398 | 0,451 | 0,420 | 0,501 | 0,418 | 0,068 | |

Anl. 4.1.2-4

| Probe 12 | Messung: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | Standart- | |
|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|-----------|--------|
| Feld | v [mm/s] | Sq [μm] | Sq [μm] | Sq [μm] | Sq [μm] | Sq [μm] | Mittelw. | abw. | T [°C] |
| 1 | 1 | 0,013 | 0,012 | 0,013 | 0,011 | 0,014 | 0,013 | 0,001 | 1600 |
| 2 | | 0,005 | 0,010 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,002 | 1700 |
| 3 | | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 1800 |
| 4 | | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 1900 |
| 5 | | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 2000 |
| 6 | | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | - | 0,003 | 0,000 | 2100 |
| 7 | 3 | 0,020 | 0,018 | 0,023 | 0,017 | 0,028 | 0,021 | 0,004 | 1600 |
| 8 | | 0,012 | 0,007 | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,002 | 1700 |
| 9 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 1800 |
| 10 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 1900 |
| 11 | | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 2000 |
| 12 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 2100 |
| Probe 13 | Ausgangsr.: | 0,044 | 0,054 | 0,051 | 0,050 | 0,072 | 0,054 | 0,011 | |
| 9 | 5 | 0,019 | 0,029 | 0,028 | 0,017 | 0,028 | 0,024 | 0,006 | 1600 |
| 10 | | 0,012 | 0,021 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,003 | 1700 |
| 11 | | 0,005 | 0,007 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,001 | 1800 |
| 12 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 1900 |
| 13 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 2000 |
| 14 | | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 2100 |
| | Ausgangsr.: | 0,040 | 0,047 | 0,060 | 0,044 | 0,055 | 0,049 | 0,008 | |

Anl. 4.1.2-5

| Cut-off | | 0,8 μm | | 2,5 μm | | 8 μm | | 25 μm | |
|---------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| v | | Rauheit | STABW | Rauheit | STABW | Rauheit | STABW | Rauheit | STABW |
| in mm/s | T [°C] | nor- miert | nor- miert | nor- miert | nor- miert | nor- miert | nor- miert | nor- miert | nor- miert |
| 1 | 1600 | 0,232 | 0,024 | 0,308 | 0,021 | 0,532 | 0,021 | 0,738 | 0,052 |
| 3 | | 0,390 | 0,081 | 0,487 | 0,075 | 0,685 | 0,073 | 0,811 | 0,065 |
| 5 | | 0,488 | 0,119 | 0,619 | 0,089 | 0,799 | 0,055 | 0,903 | 0,070 |

Anl. 4.1.3-1

| T [°C] | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Feld | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Messung 1 | 2,08 | 3,43 | 4,89 | 6,89 | 8,50 |
| Messung 2 | 1,88 | 3,07 | 4,85 | 6,57 | 7,35 |
| Messung 3 | 1,68 | 3,16 | 4,45 | 7,25 | 7,87 |
| Messung 4 | 1,84 | 3,13 | 4,70 | 6,20 | 7,43 |
| Messung 5 | | 2,95 | 4,58 | 6,72 | 8,08 |
| Mittelwert: | 0,19 | 0,31 | 0,47 | 0,67 | 0,78 |
| Standartabw.: | 0,016 | 0,018 | 0,018 | 0,039 | 0,047 |
| t _{abs} [s] | 7,484 | 8,786 | 10,445 | 11,982 | 15,095 |
| Flächenraten: | 0,00367 | 0,00886 | 0,01657 | 0,02965 | 0,03203 |
| Fehler | 0,000064572 | 0,000099603 | 0,000129839 | 0,000342218 | 0,000387737 |

Anl. 4.1.3-2

| Temperatur [°C] | t _{int} [s] | t _{abs} [s] |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| 1600 | 0,33 | 6,409 |
| 1700 | 1,45 | 7,484 |
| 1800 | 2,99 | 8,786 |
| 1900 | 4,87 | 10,445 |
| 2000 | 7,44 | 11,982 |
| 2100 | 10,85 | 15,095 |

Anl. 4.1.4-1

| Sq [µm] | | | | | | | | |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------------|
| Feld | T [°C] | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | Mittelw. | Standartabw. |
| 1 | 1600 | 0,642 | 0,732 | 0,701 | 0,752 | 0,691 | 0,704 | 0,042 |
| 2 | 1700 | 0,618 | 0,616 | 0,649 | 0,674 | 0,534 | 0,618 | 0,053 |
| 3 | 1800 | 0,699 | 0,573 | 0,610 | 0,661 | 0,502 | 0,609 | 0,077 |
| 4 | 1900 | 0,452 | 0,415 | 0,585 | 0,297 | 0,279 | 0,406 | 0,125 |
| 5 | 2000 | 0,115 | 0,191 | 0,166 | 0,173 | 0,097 | 0,148 | 0,040 |
| 6 | 2100 | 0,024 | 0,035 | 0,029 | 0,013 | 0,025 | 0,025 | 0,008 |
| Ausgangsr. | | 0,665 | 0,817 | 1,050 | 0,626 | 1,130 | 0,858 | 0,226 |

Anl. 4.1.4-2

| 0,8µm | | | | | | | |
|--------------|-------|--------|-------|-------|--------|------------|------------|
| T [C°] | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 |
| Messung | F0 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| 1 | 0,073 | 0,034 | 0,015 | 0,006 | 0,0042 | 0,00413 | 0,00407 |
| 2 | 0,041 | 0,0329 | 0,015 | 0,007 | 0,0043 | 0,00412 | 0,00404 |
| 3 | 0,054 | 0,0398 | 0,017 | 0,006 | 0,0043 | 0,00411 | 0,00398 |
| 4 | 0,061 | 0,0325 | 0,017 | 0,007 | 0,0046 | 0,00407 | 0,00411 |
| 5 | 0,047 | 0,0206 | 0,018 | 0,006 | 0,0041 | 0,00414 | 0,00403 |
| Mittelwert: | 0,055 | 0,032 | 0,016 | 0,006 | 0,0043 | 0,004114 | 0,004046 |
| Sandartabw.: | 0,013 | 0,007 | 0,001 | 3E-04 | 0,0002 | 2,7019E-05 | 4,827E-05 |
| 2,5µm | | | | | | | |
| Messung | F0 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| 1 | 0,181 | 0,103 | 0,054 | 0,014 | 0,0063 | 0,00601 | 0,00593 |
| 2 | 0,166 | 0,0989 | 0,056 | 0,015 | 0,0063 | 0,00601 | 0,00589 |
| 3 | 0,143 | 0,113 | 0,062 | 0,013 | 0,0065 | 0,00599 | 0,0058 |
| 4 | 0,155 | 0,0983 | 0,059 | 0,014 | 0,0068 | 0,00596 | 0,00598 |
| 5 | 0,125 | 0,0735 | 0,064 | 0,014 | 0,0064 | 0,00603 | 0,00588 |
| Mittelwert: | 0,154 | 0,0973 | 0,059 | 0,014 | 0,0065 | 0,006 | 0,005896 |
| Sandartabw.: | 0,021 | 0,0146 | 0,004 | 7E-04 | 0,0002 | 2,6458E-05 | 6,6558E-05 |
| 8µm | | | | | | | |
| Messung | F0 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| 1 | 0,293 | 0,206 | 0,148 | 0,058 | 0,0092 | 0,0065 | 0,00629 |
| 2 | 0,209 | 0,195 | 0,156 | 0,063 | 0,0093 | 0,00672 | 0,00624 |
| 3 | 0,249 | 0,207 | 0,161 | 0,051 | 0,0118 | 0,00663 | 0,00614 |
| 4 | 0,251 | 0,188 | 0,153 | 0,048 | 0,0131 | 0,0066 | 0,00634 |
| 5 | 0,217 | 0,175 | 0,162 | 0,058 | 0,0136 | 0,00653 | 0,00623 |
| Mittelwert: | 0,244 | 0,1942 | 0,156 | 0,056 | 0,0114 | 0,006596 | 0,006248 |
| Sandartabw.: | 0,033 | 0,0133 | 0,006 | 0,006 | 0,0021 | 8,6776E-05 | 7,4632E-05 |
| 25µm | | | | | | | |
| Messung | F0 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 |
| 1 | 0,049 | 0,357 | 0,289 | 0,193 | 0,0407 | 0,00762 | 0,00649 |
| 2 | 0,329 | 0,323 | 0,313 | 0,228 | 0,0473 | 0,0106 | 0,00639 |
| 3 | 0,461 | 0,329 | 0,31 | 0,176 | 0,0678 | 0,0102 | 0,0063 |
| 4 | 0,401 | 0,299 | 0,301 | 0,177 | 0,0684 | 0,0102 | 0,00676 |
| 5 | 0,355 | 0,323 | 0,288 | 0,205 | 0,0796 | 0,00774 | 0,00639 |
| Mittelwert: | 0,319 | 0,3262 | 0,3 | 0,196 | 0,0608 | 0,009272 | 0,006466 |
| Sandartabw.: | 0,159 | 0,0207 | 0,012 | 0,022 | 0,0162 | 0,00146305 | 0,00017757 |

Anl. 4.2.1-1

geglättet

Probe 1 Höhenstufen in μm

| Messung/Feld | a | a | b | c | d |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,17 | 0,145 | 0,525 | 0,703 | 1,12 |
| 2 | 0,161 | 0,133 | 0,495 | 0,726 | 1,14 |
| 3 | 0,151 | 0,15 | 0,473 | 0,744 | 1,1 |
| 4 | 0,16 | 0,151 | 0,424 | 0,68 | 1,14 |
| 5 | 0,17 | 0,151 | 0,472 | 0,778 | 1,06 |
| 6 | 0,163 | 0,139 | 0,448 | 0,678 | 1,1 |
| 7 | 0,151 | 0,155 | 0,449 | 0,647 | 1,12 |
| 8 | | | 0,437 | 0,717 | 1,11 |
| 9 | | | 0,412 | 0,661 | 1,04 |
| 10 | | | 0,408 | 0,698 | 1,04 |
| 11 | | | 0,381 | 0,791 | 1,09 |
| 12 | | | 0,429 | 0,636 | 1,11 |
| Mittelwert: | -0,161 | -0,146 | -0,469 | -0,708 | -1,111 |
| Standartabw.: | 0,0078 | 0,0078 | 0,0402 | 0,0489 | 0,0344 |

Probe

1 Höhenstufen

ungeglättet

| Feld | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Messung | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] |
| 1 | 0,162 | 0,522 | 0,517 | 0,565 | 0,731 | 1,21 |
| 2 | 0,175 | 0,497 | 0,528 | 0,524 | 0,726 | 1,19 |
| 3 | 0,149 | 0,504 | 0,513 | 0,523 | 0,749 | 1,16 |
| 4 | 0,161 | 0,522 | 0,538 | 0,54 | 0,755 | 1,21 |
| 5 | 0,181 | 0,506 | 0,505 | 0,577 | 0,783 | 1,21 |
| 6 | 0,175 | 0,528 | 0,47 | 0,544 | 0,804 | 1,17 |
| 7 | 0,171 | 0,5 | 0,458 | 0,6 | 0,783 | 1,19 |
| 8 | 0,172 | 0,51 | 0,574 | 0,609 | 0,79 | 1,16 |
| 9 | 0,156 | 0,516 | 0,513 | 0,568 | 0,755 | 1,24 |
| 10 | 0,174 | 0,539 | | 0,555 | 0,722 | 1,27 |
| 11 | 0,153 | 0,478 | | 0,523 | 0,798 | 1,25 |
| 12 | 0,165 | 0,561 | | 0,555 | 0,704 | 1,24 |
| Mittelwert: | 0,166 | 0,515 | 0,513 | 0,557 | 0,758 | 1,208 |
| Standartabw.: | 0,010 | 0,022 | 0,035 | 0,029 | 0,033 | 0,036 |

4.2.1-2

| Struktur | a | c | e | f |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Sq vor [nm] | 14,6 | 26,2 | 38,9 | 36,9 |
| Sq nach [nm] | 6,05 | 13,5 | 15 | 22,5 |
| Dämpfung | 0,414 | 0,515 | 0,386 | 0,610 |
| Höhenst. [µm] | 0,166 | 0,513 | 0,758 | 1,208 |

4.2.2-1

ungeglättet

| Feld | a | a | b | b | c | c |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Höhenst. in [µm] | 1,540 | 1,450 | 0,704 | 0,610 | 0,172 | - |
| | 1,570 | 1,490 | 0,677 | 0,616 | 0,173 | - |
| | 1,510 | 1,550 | 0,627 | 0,644 | 0,137 | - |
| | 1,550 | 1,560 | 0,704 | 0,693 | 0,156 | - |
| | 1,570 | 1,490 | 0,729 | 0,595 | 0,122 | - |
| | 1,550 | 1,500 | 0,708 | 0,645 | 0,133 | - |
| | 1,530 | 1,530 | 0,685 | 0,630 | 0,164 | - |
| | 1,560 | 1,540 | 0,682 | 0,595 | 0,164 | - |
| | 1,700 | 1,580 | 0,702 | 0,598 | 0,147 | - |
| | 1,720 | 1,560 | 0,705 | 0,609 | 0,173 | - |
| | 1,570 | 1,520 | 0,708 | 0,583 | 0,169 | - |
| | 1,560 | 1,580 | 0,703 | 0,609 | 0,159 | - |
| | 1,590 | 1,490 | 0,698 | 0,612 | 0,172 | - |
| | 1,560 | 1,540 | | 0,666 | 0,150 | - |
| | 1,590 | 1,590 | | 0,655 | 0,140 | - |
| | 1,620 | 1,580 | | 0,637 | 0,137 | - |
| | 1,590 | 1,540 | | 0,653 | 0,161 | - |
| | 1,530 | 1,510 | | 0,628 | 0,144 | - |
| Mittelwert: | 1,578 | 1,533 | 0,695 | 0,627 | 0,154 | - |
| Standartabw.: | 0,055 | 0,039 | 0,024 | 0,029 | 0,016 | - |

zu Anl. 4.2.2-1

geglättet

| Feld | a | a | b | b | c | c |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Höhenst. in [µm] | 1,570 | 1,430 | 0,703 | 0,608 | 0,133 | 0,181 |
| | 1,620 | 1,380 | 0,682 | 0,606 | 0,142 | 0,181 |
| | 1,540 | 1,380 | 0,661 | 0,629 | 0,157 | 0,177 |
| | 1,530 | 1,430 | 0,683 | 0,633 | 0,135 | 0,201 |
| | 1,530 | 1,360 | 0,659 | 0,598 | 0,138 | 0,177 |
| | 1,500 | 1,370 | 0,667 | 0,590 | 0,150 | 0,201 |
| | 1,450 | 1,360 | 0,664 | 0,604 | 0,143 | 0,204 |
| | 1,500 | 1,380 | 0,688 | 0,602 | 0,133 | 0,189 |
| | 1,480 | 1,310 | 0,644 | 0,610 | 0,155 | 0,194 |
| | 1,470 | 1,440 | 0,629 | 0,639 | 0,157 | 0,200 |
| | 1,490 | 1,370 | 0,628 | 0,635 | 0,145 | 0,200 |
| | 1,570 | 1,350 | 0,657 | 0,647 | 0,155 | 0,181 |
| | 1,610 | 1,420 | 0,696 | 0,627 | 0,151 | 0,176 |
| | 1,540 | 1,370 | 0,669 | 0,602 | 0,151 | 0,188 |
| | 1,570 | 1,290 | 0,646 | 0,628 | 0,157 | 0,180 |
| | 1,510 | 1,370 | 0,678 | 0,635 | 0,146 | 0,204 |
| | 1,470 | 1,390 | 0,669 | 0,601 | 0,138 | 0,197 |
| | 1,560 | 1,430 | 0,65 | 0,641 | 0,153 | |
| Mittelwert: | 1,528 | 1,379 | 0,665 | 0,619 | 0,147 | 0,190 |
| Standartabw.: | 0,049 | 0,041 | 0,021 | 0,018 | 0,009 | 0,011 |

Anl. 4.2.2-2

| Struktur Typ | Sq vor [nm] | Sq nach [nm] | Dämpfung |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| a | 14,1 | 8,6 | 0,60992908 |
| b | 26,4 | 18,9 | 0,71590909 |
| c | 39,7 | 23,5 | 0,59193955 |

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname

